

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODELOVÁNÍ AKUSTIKY UZAVŘENÝCH PROSTORŮ PAPRSKOVOU
METODOU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK RYŠAVÝ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODELOVÁNÍ AKUSTIKY UZAVŘENÝCH PROSTORŮ PAPRSKOVOU METODOU

MODELLING OF CLOSED SPACE ACOUSTICS BY THE BEAM METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK RYŠAVÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL TRZOS

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Marek Ryšavý

ID: 125622

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Modelování akustiky uzavřených prostorů paprskovou metodou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Napište skript v prostředí Matlab, který bude modelovat akustiku místnosti zadaných rozměrů a koeficientů pohltivosti pomocí paprskové metody. Jako vstupní parametry by měl skript přijímat regulární topologii místnosti se zadáním faktorů pohltivosti. Dále by vstupem měla být i pozice zdroje a pozice posluchače. Výstupem by mělo být 2D zobrazení místnosti se zobrazením vyslaných paprsků, kmitočtová charakteristika a přenosová funkce. Délka vykonávání skriptu by měla být maximálně v řádu minut.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelock, D., Kuwano, S., Vorländer, M., Handbook of Signal Processing in Acoustics. Springer Science+Business Media, 2008. ISBN 978-0-387-77698-9
- [2] Mechel, F.P., Formulas of Acoustics. Springer Science+Business Media, 2008. ISBN 978-3-540-76832-6

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 5.6.2013

Vedoucí práce: Ing. Michal Trzos

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá modelováním prostorové akustiky pomocí paprskové metody – ray-tracing. V první kapitole se práce zabývá obecným popisem základních vlastností akustiky prostorů, popisem základních metod zkoumání prostorové akustiky (vlnová akustika, statistická akustika a geometrická akustika) a obecným popisem základních metod geometrické akustiky (metody zrcadlových zdrojů, ray-tracing a beam-tracing). V druhé kapitole práce je popsána implementace metody ray-tracing ve vytvořené aplikaci.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ray-tracing, prostorová akustika, doba dozvuku, činitel zvukové pohltivosti, paprsková metoda, kritický kmitočet, impulzní odezva, geometrická akustika, metoda Monte-Carlo, frekvenční charakteristika.

ABSTRACT

The bachelor thesis describes the modeling of room acoustics using the ray tracing method. The first chapter deals with a general description of the basic properties of acoustic environment (wave acoustics, statistical acoustics and geometric acoustics). Then are described methods of calculating geometrical acoustics (image-source method, ray-tracing method and beam-tracing method). In the second chapter of this work is described in detail ray tracing methods and algorithm for calculate room acoustic using this method.

KEYWORDS

Ray-tracing, room acoustics, reverberation time, sound absorption coefficient, beam-tracing, critical frequency, impulse response, geometric acoustics, Monte-Carlo method, frequency response.

RYŠAVÝ, Marek *Modelování akustiky uzavřených prostorů paprskovou metodou*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 57 s. Vedoucí práce byl Ing. Michal Trzos

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Modelování akustiky uzavřených prostorů paprskovou metodou“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalu Trzosovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	11
1 Akustika uzavřeného prostoru	12
1.1 Šíření zvuku v prostoru	12
1.2 Vlnová akustika	13
1.3 Statistická akustika	15
1.3.1 Pohltivost uzavřeného prostoru	16
1.3.2 Doba dozvuku	18
1.3.3 Kritický kmitočet	20
1.4 Geometrická akustika	20
1.4.1 Metoda zrcadlových zdrojů	21
1.4.2 Metoda ray-tracing	23
1.4.3 Metoda beam-tracing	24
2 Modelování metodou ray-tracing	25
2.1 Algoritmus Monte-Carlo	25
2.2 Implementovaný algoritmus	26
2.2.1 Vstupní data	26
2.2.2 Příprava vstupních dat	27
2.2.3 Výpočet šíření paprsků	29
2.2.4 Zpracování výsledků	31
2.3 Modelování prostoru	32
3 Závěr	34
Literatura	35
Seznam symbolů, veličin a zkratk	36
Seznam příloh	37
A Akustika uzavřeného prostoru	38
A.1 Hodnoty oktavových a třetinoctavových pásem	38
A.2 Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α_p pro vybrané materiály	38

B Simulace	39
B.1 Vstupní data	39
B.2 Výsledky – výpočet do 10. řádu odrazu	40
B.2.1 Tabulka výsledků	40
B.2.2 Výsledné charakteristiky	41
B.2.3 Zobrazení detekovaných paprsků	44
B.3 Výsledky – výpočet do 15. řádu odrazu	46
B.3.1 Tabulka výsledků	46
B.3.2 Výsledné charakteristiky	47
B.3.3 Zobrazení detekovaných paprsků	50
B.4 Výsledky – výpočet do 20. řádu odrazu	51
B.4.1 Tabulka výsledků	51
B.4.2 Výsledné charakteristiky	52
B.4.3 Zobrazení detekovaných paprsků	55
C Návod k použití aplikace	56
D Obsah přiloženého CD	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Šíření zvuku v kulových vlnoplochách. [8]	13
1.2	Dutý kvádr s charakteristickými rozměry.	14
1.3	Princip odrazu, pohlcení a rozptylu energie na rozhraní prostředí. [10]	16
1.4	Průběh zvukové energie v uzavřeném prostoru. [10]	18
1.5	Ukázka odečítání doby dozvuku při měření metodou přerušovaného šumu.	19
1.6	Zákon dopadu a odrazu paprsku. [10]	20
1.7	Reálný odraz paprsku od povrchu určité drsnosti. [6]	21
1.8	Metoda zrcadlových zdrojů. [6]	22
1.9	Výpočet odražených paprsků metodou zrcadlových zdrojů. [5]	22
1.10	Zkoumání paprsků pomocí metody ray-tracing. [5]	23
1.11	Ořezávání a odraz paprsku metody beam-tracing. [5]	24
2.1	Algoritmus Monte-Carlo. [6]	25
2.2	Základní části implementovaného algoritmu.	26
2.3	Použité části algoritmu.	27
2.4	Vytvářený prostor.	28
2.5	Vytvoření počátečních vektorů.	29
2.6	Algoritmus sledování šíření paprsků prostorem.	30
2.7	Zpracování a zobrazení výsledků.	31
2.8	Závislost průměrné doby výpočtu na počtu paprsků.	32
2.9	Závislosti průměrného počtu detekovaných na počtu vyslaných paprsků.	32
2.10	Porovnání frekvenčních charakteristik vypočtených z hodnot α_w a α_p .	33

SEZNAM TABULEK

1.1	Směrná křivka dle ISO EN ČSN 11654 [3]	17
-----	--	----

ÚVOD

Hodnocení prostorové akustiky a sledování jejích parametrů je důležité zejména v místnostech sloužících pro produkci zvukových signálů (hudba, řeč) nebo v místnostech sloužících pro záznam těchto signálů.

Na každý z prostorů, ať veřejný (kulturní centra, divadelní sály, kina, kluby, sportovní haly, přednáškové místnosti, atd.) nebo specializovaný (nahrávací studia, rozhlasová a televizní studia, akustické laboratoře, atd.), jsou kladeny určité požadavky. Tyto požadavky bývají přesně definovány technickými normami. U nás to je například ČSN 73 0525 [4].

Proto, aby tyto požadavky mohly být splněny, je nutné znát podrobnosti o šíření a chování zvuku v daném prostoru. Tyto podrobnosti je možné získat buď měřením nebo modelováním akustiky daného prostoru. Tato práce se zabývá rozbořením možností zkoumání akustiky a vytvořením postupu pro použití jedné z metod geometrické akustiky, metody ray-tracing.

Metody pro zkoumání prostorové akustiky jsou rozebrány v první kapitole. Vytvořená aplikace je popsána v kapitole druhé společně s výsledky simulací provedenými touto aplikací.

Na základě zvoleného postupu práce – popis vlastností stěn pomocí činitele zvukové pohltivosti, ne pomocí filtrů – bylo po domluvě s vedoucím práce vynecháno řešení přenosové funkce prostoru. Výsledná přenosová funkce by kvůli řešení pohltivosti pouze v určitých frekvenčních pásmech neodpovídala skutečnosti.

1 AKUSTIKA UZAVŘENÉHO PROSTORU

Jelikož zvuk hodnotíme pro uzavřený prostor, je vhodné nejdříve definovat pojem „uzavřený prostor“.

Uzavřeným prostorem je myšlena jakákoli část euklidovského trojrozměrného prostoru E_3 [1] určité velikosti mající svůj objem, která je ohraničená ze všech svých stran hraničními plochami. Plochami můžou být jak ohraničené roviny, tak i jiné typy ploch, např. přímkové plochy, klínové parabolické plochy, atd.

Každá z těchto ploch (dále tyto plochy budu označovat jako stěny) vykazuje určité akustické vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří například průzvučnost, difuzita a zvuková pohltivost.

Průzvučnost je zkoumána ve stavební akustice z důvodů zajištění hlukových hygienických norem v budovách. Podrobně je tato problematika rozebrána v literatuře, například v [10].

Difuzita je vlastnost materiálu závislá na členitosti povrchu materiálu, tato vlastnost určuje rozptyl odražené zvukové energie po dopadu zvukové vlny na tento povrch. Tato vlastnost je frekvenčně závislá a bývá udávána koeficientem difuzity.

Zvuková pohltivost je závislá materiálu, z něž je stěna vyrobena, na drsnosti povrchu, pórovitosti a u slabších stěn (např. desek, skel) na pružnosti a plošné hmotnosti. Zvuková pohltivost je frekvenčně závislá.

Jak je popsáno v [10], šíření zvuku v uzavřeném prostoru je dáno stavem šířící se akustické energie, geometrií daného prostoru a stavem zvukového pole.

Analýza akustiky prostoru se dá řešit více postupy, každý z nich má určité využití a určitou obtížnost při výpočtu. Základními metodami analýzy jsou vlnová akustika, statistická akustika a geometrická akustika.

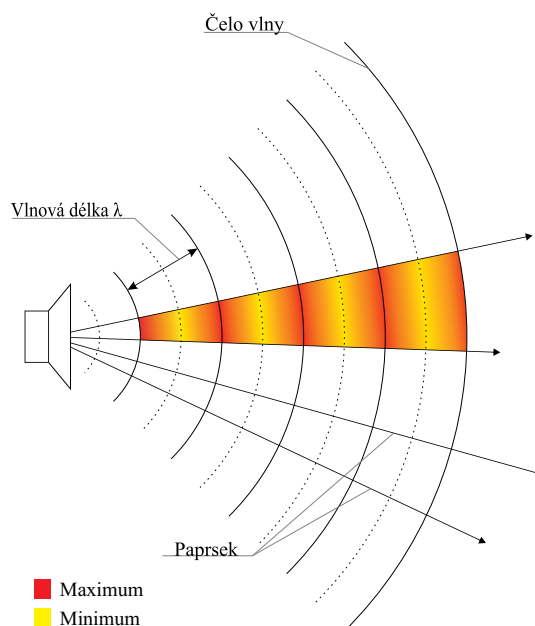
1.1 Šíření zvuku v prostoru

V následujících kapitolách popíši, jaké jsou možné způsoby analýzy chování zvuku v uzavřeném prostoru. Aby bylo možné tuto analýzu provést, je nutné znát, jak se zvuk šíří obecně v prostoru.

Prostor, ve kterém se zvuk šíří, se nazývá zvukovým polem a zvuk se tímto polem šíří jako mechanické vlnění hmotných částic daného prostoru[8]. Toto vlnění se od svého zdroje šíří v kuloplochách, viz obr. 1.1 vlevo. Tyto kuloplochy mají stejný činný výkon. Se vzrůstající vzdáleností se ovšem zmenšuje intenzita kuloplochy. Činný výkon kuloplochy je definován jako[7]:

$$P = 4\pi r_1^2 \cdot I_1 = 4\pi r_2^2 \cdot I_2. \quad (1.1)$$

kde I_1 a I_2 jsou intenzity zvuku ve vzdálenostech r_1 a r_2 .



Obr. 1.1: Šíření zvuku v kulových vlnoplochách. [8]

Z rovnice (1.1) vyplývá vztah

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}, \quad (1.2)$$

podle kterého intenzita kuloplochy klesá se čtvercem vzdálenosti. Po úpravě tohoto vztahu získáme vztah popisující změnu hladiny intenzity zvuku se změnou vzdálenosti od zdroje

$$L_I = 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1}. \quad (1.3)$$

Pokud jako referenční vzdálenost r_1 zvolíme 1 m (intenzita zvuku I_1 by byla změřena v jednom metru od zdroje), pak pro výpočet úbytku hladiny intenzity ve vzdálenosti větší než jeden metr platí vztah

$$L_I = 20 \cdot \log r_2. \quad (1.4)$$

1.2 Vlnová akustika

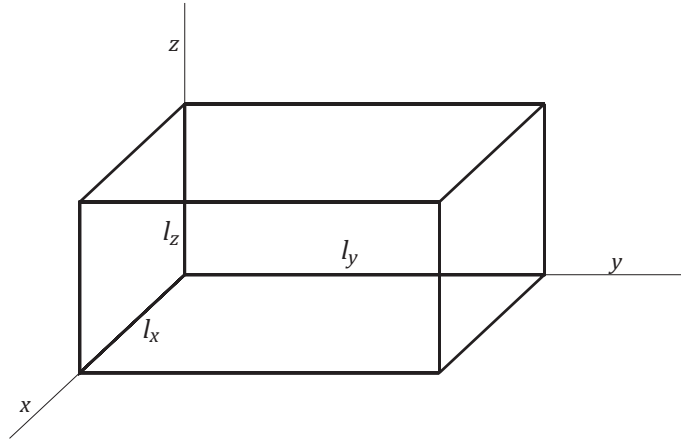
Vlnová akustika je nejobecnějším popisem akustických vlastností prostorů. Zakládá se na základních fyzikálních poznatcích o vlnění a jeho šíření v plynech, kapalinách a pevných látkách.

Díky obecnosti a variabilitě je velice složité hodnotit akustiku daného prostoru pomocí metody vlnové akustiky, protože tato metoda popisuje pouze fyzikální vlastnosti prostoru a nezahrnuje lidské vnímání zvuku.

Pomocí této metody zkoumáme základní fyzikální vlastnosti prostorů. Příkladem mohou být vlastní kmity místnosti (dutého kvádru, viz. obr. 1.2). Frekvenci těchto kmitů spočítáme pomocí rovnice [10]

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (1.5)$$

kde f_{n_x, n_y, n_z} je vypočítaná frekvence módu, c_0 je rychlost zvuku ve vzduchu, $l_{x,y,z}$ jsou charakteristické rozměry námi počítaného prostoru a $n_{x,y,z}$ jsou libovolná přirozená čísla, která udávají příslušný mód místnosti.



Obr. 1.2: Dutý kvádr s charakteristickými rozměry.

V případě, že dvě z těchto čísel budou nulová, výsledná frekvence bude frekvencí osového (axiálního) módu místnosti [9], např. $f_{n_x, 0, 0}$

$$n_x = 1, n_y = n_z = 0 \rightarrow f_{1,0,0}. \quad (1.6)$$

V případě, že jedno z těchto čísel bude rovno nule, dostáváme frekvenci takzvaného tangenciálního módu, např. $f_{n_x, n_y, 0}$

$$n_x = 1, n_y = 2, n_z = 0 \rightarrow f_{1,2,0}. \quad (1.7)$$

Poslední možností jsou všechna čísla n různá od nuly, tímto získáme frekvenci šikmého (kosého) módu, např. f_{n_x, n_y, n_z}

$$n_x = 1, n_y = 2, n_z = 3 \rightarrow f_{1,2,3}. \quad (1.8)$$

Hledání vlastních kmitů místnosti a určování jejich počtu pod určitým kmitočtem f_n je jednou z úloh stavební akustiky. Znalost vlastních kmitů a jejich počtu je důležitá převážně z hlediska návrhu základních rozměrů místnosti. Pro celkový počet kmitů n pod kmitočtem f_n je uváděn v literatuře (např. [9]) vztah:

$$n = \frac{4}{3}\pi V \cdot \frac{f_n^3}{c_0^3} + \frac{\pi S}{4} \cdot \frac{f_n^2}{c_0^2} + \frac{L}{8} \cdot \frac{f_n}{c_0} + \epsilon, \quad (1.9)$$

kde objem V vypočítáme ze vztahu (1.10), c_0 je rychlost šíření zvuku ve vzduchu, plochu S vypočítáme dle vztahu (1.11), L je celková délka všech stran – vztah (1.12) a ϵ je číslo doplňující číslo n na celé číslo. První člen této rovnice udává celkový počet axiálních módů, druhý člen udává celkový počet tangenciálních módů a třetí člen udává celkový počet šikmých módů v prostoru [9].

$$V = l_x \cdot l_y \cdot l_z . \quad (1.10)$$

$$S = 2 \cdot (l_x \cdot l_y + l_x \cdot l_z + l_y \cdot l_z) . \quad (1.11)$$

$$L = 4 \cdot (l_x + l_y + l_z) . \quad (1.12)$$

Z hlediska vlastních kmitů a jejich rozložení literatura [9] uvádí optimální rozměry pravoúhlého prostoru:

$$1,84 \leq \frac{\text{délka}}{\text{výška}} \leq 3,46 , \quad (1.13)$$

$$1,42 \leq \frac{\text{šířka}}{\text{výška}} \leq 2,31 , \quad (1.14)$$

proto se například u menších studií volí poměr mezi rozměry délka : šířka : výška daného prostoru 2,5 : 1,5 : 1 a u větších studií 3 : 2 : 1.

Tato metoda se díky fyzikálnímu principu využívá při architektonickém (stavebním) návrhu místnosti, ovšem její využití je velice výpočetně náročné. Z výše uvedeného postupu výpočtu vlastních kmitů vyplývá, že plně platí pouze pro tvar prostoru dutého kvádrů. Pro složitější prostory již tento postup neplatí a se zvyšující se složitostí prostoru náročnost výpočtu exponenciálně roste.

1.3 Statistická akustika

Metoda statistické akustiky je obecně nejpoužívanější metoda analýzy prostorové akustiky. Řešení pomocí této metody se ale omezuje pouze na uzavřené prostory, jelikož podmínky této metody předpokládají mnohočetné odrazy od stěn ohraničujících prostor.

Aby tato metoda mohla být využívána, předpokládá se, že [10]:

- 1) intenzita zvuku je ve všech místech uzavřeného prostoru stejná,
- 2) všechny úhly, pod kterými dopadá zvukové vlnění do určitého bodu, jsou rovnoměrně zastoupeny,
- 3) intenzita zvuku v libovolném místě uzavřeného prostoru je součtem průměrných intenzit zvuku, který došel do uvažovaného bodu odrazy od povrchů.

1.3.1 Pohltivost uzavřeného prostoru

Při dopadu zvukové vlny na stěnu uzavřeného prostoru dochází k částečnému pohlcení (proniknutí určité části energie E do konstrukce stěny), částečnému odrazu energie zpět do prostoru a část energie se díky difuznímu odrazu rozptýlí, viz obr. 1.3.

Celková energie E dopadající na stěnu se rozdělí mezi energii odraženou, pohlcenou a rozptýlenou, vztah pro celkovou energii je [10]

$$E = E_0 + E_P + \sum E_R , \quad (1.15)$$

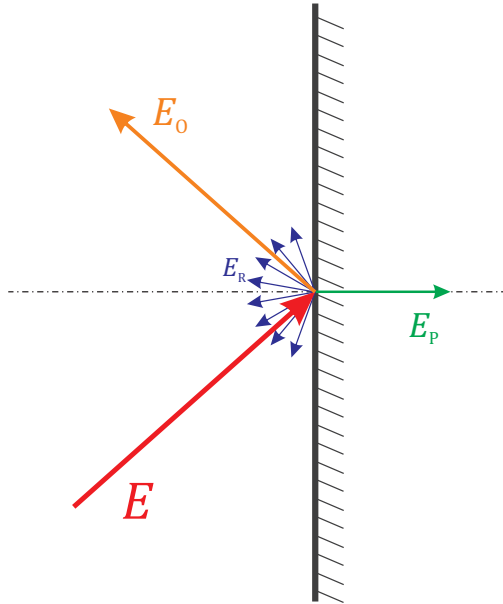
kde E_0 je odražená energie, E_P je energie pohlcená stěnou a E_R je rozptýlená část energie. Jelikož je obecně součet rozptýlené energie malý (pokud není stěna speciálně upravena pro roztříštění zvukové vlny, např. difuzními panely), bývá tato energie zanedbávána. Tím můžeme rovnici (1.15) upravit do tvaru

$$E \cong E_0 + E_P . \quad (1.16)$$

Vlastnost materiálu pohlcování zvukové energie je popisována činitelem zvukové pohltivosti α . Ten je určen poměrem energie pohlcené vůči energii odražené, viz následující vztah [10]:

$$\alpha = \frac{E_P}{E_0} = \frac{E - E_0}{E_0} . \quad (1.17)$$

Úplnou absorpci zde charakterizuje $\alpha=1$ a úplnou odrazivost $\alpha=0$.



Obr. 1.3: Princip odrazu, pohlcení a rozptylu energie na rozhraní prostředí. [10]

Činitel zvukové pohltivosti se stanovuje laboratorně ze vzorků materiálu dle platných norem, například ČSN ISO 10534-1 a ČSN ISO 10534-2 (Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích).

Dále norma ČSN 11654 [3] uvádí formáty pro udávání činitele zvukové pohltivosti. Prvním tvarem je činitel zvukové pohltivosti α_s , který je udáván v třetinooktákových pásmech. Jedná se o laboratorně změřenou hodnotu. Dalším tvarem je praktický činitel zvukové pohltivosti α_p , který se určuje z činitele zvukové pohltivosti α_s pomocí vztahu

$$\alpha_{p_i} = \frac{\alpha_{s_{i1}} + \alpha_{s_{i2}} + \alpha_{s_{i3}}}{3}, \quad (1.18)$$

kde α_{p_i} je činitel zvukové pohltivosti pro oktákové pásmo i a $\alpha_{s_{i1}}$, $\alpha_{s_{i2}}$ a $\alpha_{s_{i3}}$ jsou příslušná třetinooktáková pásma. Dále je pak tato vypočítaná hodnota zaokrouhlena na dvě desetinná místa s krokem 0,05. Tabulka oktákových pásem a třetinooktákových pásem je uvedena v příloze A.1.

Posledním vyjádřením činitele zvukové pohltivosti je vážený činitel zvukové pohltivosti α_w . K výpočtu α_w se použijí hodnoty α_p a směrná křivka udaná tabulkou (tab. 1.1). Směrná křivka se posunuje po krocích 0,05 směrem k hodnotám α_p , dokud součet nepříznivých odchylek neklesne pod 0,10. Nepříznivá odchylka vznikne tehdy, když je naměřená hodnota menší než směrná křivka. Vážený činitel zvukové pohltivosti α_w se odečte z posunuté směrné křivky na hodnotě 500 Hz.

Tab. 1.1: Směrná křivka dle ISO EN ČSN 11654 [3]

Kmitočet	250	500	1000	2000	4000
Hodnota	0,8	1	1	1	0,9

Za pomoci činitele zvukové pohltivosti máme definovány akustické vlastnosti stěny místnosti. Za pomoci znalosti obsahů povrchů stěn můžeme určit takzvanou pohltivost uzavřeného prostoru A . Tato hodnota reprezentuje pohltivost celého prostoru jako celku. Tato hodnota se vypočítá ze vztahu [10]:

$$A = \alpha \cdot S, \quad (1.19)$$

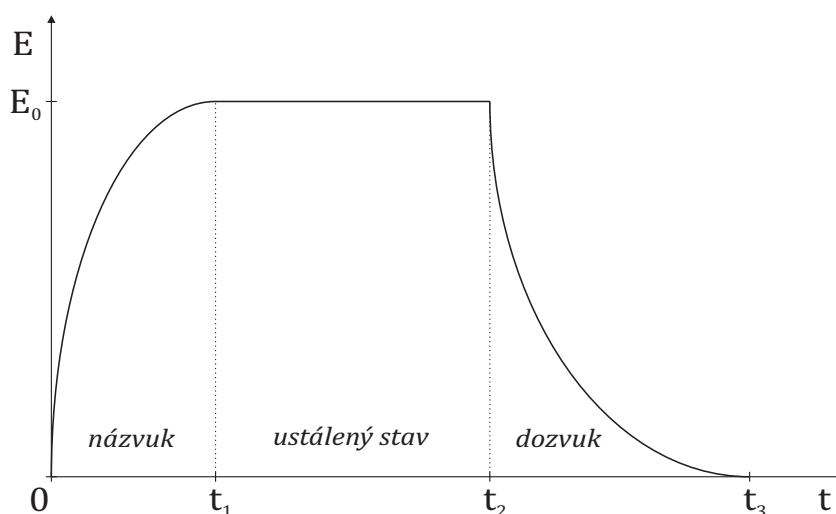
kde α je činitelem zvukové pohltivosti daného povrchu a S je obsah povrchu dané stěny. Jelikož ovšem místnosti mají různé povrchy stěny a tím i různé hodnoty α , je potřeba vzorec (1.19) poněkud upravit [10],

$$A = \sum_{x=1}^n \alpha_x \cdot S_x. \quad (1.20)$$

1.3.2 Doba dozvuku

Základním parametrem užívaným v metodě prostorové akustiky je doba dozvuku T_{60} .

Po umístění zdroje zvuku v místnosti a po zapnutí budícího signálu bude časový průběh rozprostřené energie v místnosti vypadat jako na obr. 1.4. Po zapnutí zdroje zvuku v čase $t = 0$ dojde k přechodnému ději, který bývá označován jako „názvuk“. Během tohoto děje roste energie uvnitř místnosti až do doby t_1 , kdy je prostor již plně nasycen energií vydávané zdrojem, tento stav se nazývá „ustálený stav“. Po vypnutí zdroje (čas t_2) hustota energie v prostoru exponenciálně klesá až do času t_3 , kdy je hodnota energie nulová.



Obr. 1.4: Průběh zvukové energie v uzavřeném prostoru. [10]

Doba dozvuku je definována jako čas, který uplyne od doby t , kdy byl vypnut zdroj zvuku, do doby, než hustota energie v prostoru poklesne o 60 dB, což odpovídá 10^{-6} [10] násobku původního objemu hustoty energie v místnosti. Proto se získaná doba dozvuku se označuje jako T_{60} .

Určení doby dozvuku je možné vypočítat podle známých parametrů místnosti nebo je ji možné změřit.

Při výpočtu doby dozvuku je třeba znát parametry místnosti: pohltivost uzavřeného prostoru A , tím i činitele zvukové pohltivosti α a povrch stěn S . Dále je také třeba znát objem celé místnosti V . První z rovnic pro výpočet doby dozvuku definoval fyzik Wallace Clement Sabine, který také jako první definoval pojem „doba dozvuku“. Sabinův vztah pro výpočet doby dozvuku T_S je [10]

$$T_S = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S} = 0,164 \cdot \frac{V}{A} . \quad (1.21)$$

Tento vztah lze využít pouze tehdy, je-li $\alpha < 0,25$. Pokud je α větší než zmiňovaná hodnota, je třeba využít Eyringova vztahu [10]

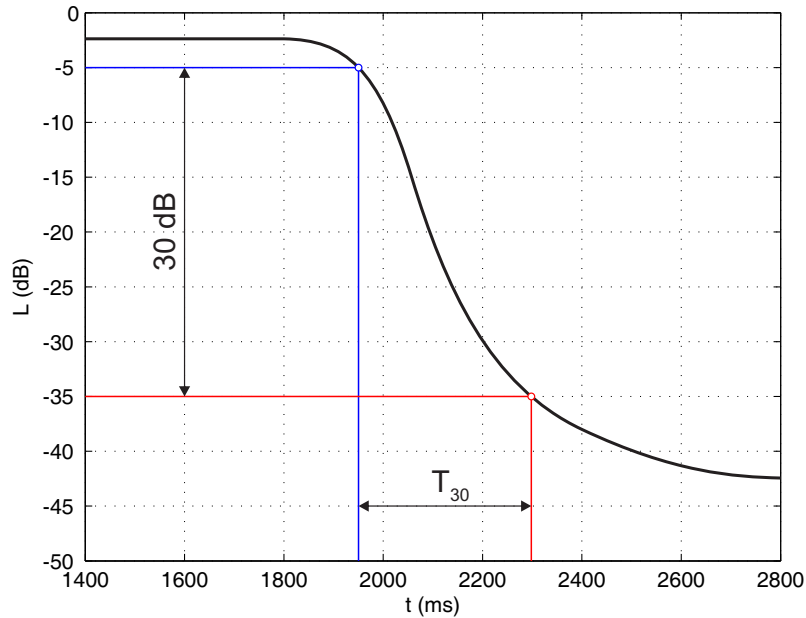
$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-\ln(1 - \alpha) \cdot S} . \quad (1.22)$$

Nevýhodou tohoto vztahu je však nemožnost využití pro složitější prostory s různými činiteli zvukové pohltivosti odpovídajícími různě velkým plochám stěn. Pro tento případ existuje ještě jeden vzorec pro výpočet. Doba dozvuku podle Millingtona je výpočetně nejnáročnější, ovšem nejpřesnější [10]:

$$T_M = 0,164 \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} , \quad (1.23)$$

kde S_i a α_i jsou parametry stěny i .

Při zjišťování doby dozvuku měřením se využívá různých metod, např. metoda přerušovaného šumu nebo metoda integrované impulzní odezvy. Na obr. 1.5 je zobrazeno odečítání hodnot doby dozvuku při měření metodou přerušovaného šumu [10]. Jelikož v praxi bývá častým jevem hluk na pozadí, nebývá možné změřit dobu dozvuku T_{60} , proto se využívají doby dozvuku T_{30} a T_{20} pro pokles zvukové energie o 30 nebo 20 dB.



Obr. 1.5: Ukázka odečítání doby dozvuku při měření metodou přerušovaného šumu.

1.3.3 Kritický kmitočet

Jak jsem již uvedl v kapitole 1.2, v uzavřeném prostoru určité velikosti vznikají tomu odpovídající vlastní kmity (módy) místnosti.

Problém nastává pro menší, málo tlumené místnosti, kdy tyto módy nejsou rovnoměrně rozloženy v celé šíři kmitočtového spektra. V takovémto případě je v daném prostoru přenosová charakteristika místnosti silně závislá na poloze zdroje (např.: reproduktoru) a přijímače (posluchače). Pro střední a vyšší kmitočty je obvykle vzdálenost mezi kmity (módy) na frekvenční ose již malá, takže budící signál v této části spektra vyvolá řadu blízkých vlastních kmitů, jejichž vzdálenost od budícího kmitočtu má gaussovské rozložení.

Kmitočet, od kterého jsou střední a vyšší kmitočty rovnoměrně rozloženy se nazývá kritický kmitočet f_k , přesněji dolní kritický kmitočet, jež se vypočítá ze vztahu

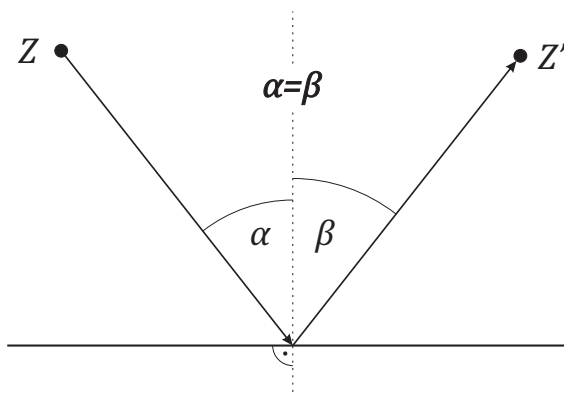
$$f_k = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}}, \quad (1.24)$$

kde T je doba dozvuku místnosti a V je objem místnosti.

1.4 Geometrická akustika

Poslední metodou pro zkoumání akustiky je metoda geometrické akustiky. Jedním z hlavních úkolů geometrické akustiky je přesné zjištění cest šíření zvuku od zdroje k přijímači (posluchači).

Z fyzikální podstaty se zvuk šíří v kuloplochách, pro větší vzdálenosti lze tyto kuloplochy nahradit rovinnou vlnou. Sledováním chování těchto kuloploch v prostoru se zabývá vlnová akustika, ale jak již bylo dříve zmíněno, je to velice výpočetně náročné. Proto když nahradíme tyto vlnoplochy nekonečným počtem vektorů šířících

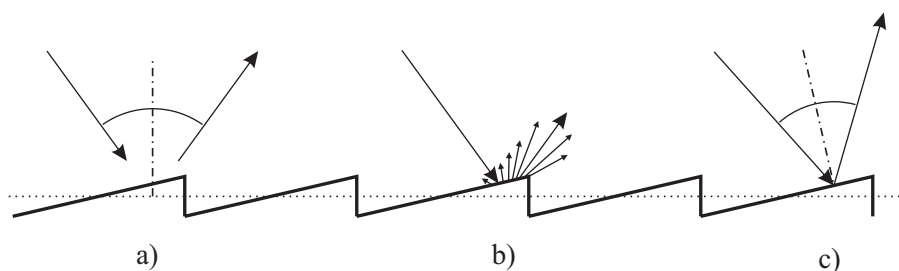


Obr. 1.6: Zákon dopadu a odrazu paprsku. [10]

se od zdroje všemi směry (v praxi tyto vektory nazýváme paprsky), kterými by se šířila kulová nebo rovinná vlnoplocha, získáme metodu geometrické akustiky.

Jak jsem již zmínil, v teoretické rovině je těchto paprsků nekonečné množství. Kvůli tomu nelze v praxi provést výpočet. V praxi se tedy uvažuje jen omezené množství paprsků, ale přesto mohou být těchto paprsků v řádově desetitisíce. Z tohoto důvodu jsou paprskové metody řešeny pouze za pomoci výpočetní techniky.

Geometrická akustika vychází ze zákona dopadu a odrazu, který říká, že úhel odraženého paprsku je roven úhlu dopadajícího paprsku. Tento zákon je zobrazen na obr. 1.6. V praxi celá záležitost není tak jednoznačná. Povrchy stěn nejsou ideálně rovné, mají určitou drsnost povrchu. Odraz od reálného povrchu závisí na kmitočtu dopadajícího signálu. Na obr. 1.7 a) je znázorněn odraz signálu s nízkým kmitočtem, kdy vlnová délka signálu je daleko větší než nerovnost povrchu. Tehdy se odraz řídí dle kolmice odrazu na celkovou plochu stěny [6]. Pro oblast středních kmitočtů – délka vlny signálu je stejná jako velikost nerovností na stěně – dochází k náhodnému rozptylu, obr. 1.7 b). Větší část energie je ovšem vyzářena podle pravidel odrazu a dopadu. Pro oblast vysokých kmitočtů se opět odraz řídí zákonem odrazu a dopadu, jen s tím rozdílem, že kolmice odrazu se vztahuje k povrchu nerovnosti, ne na celkovou plochu stěny, viz obr. 1.7 c).

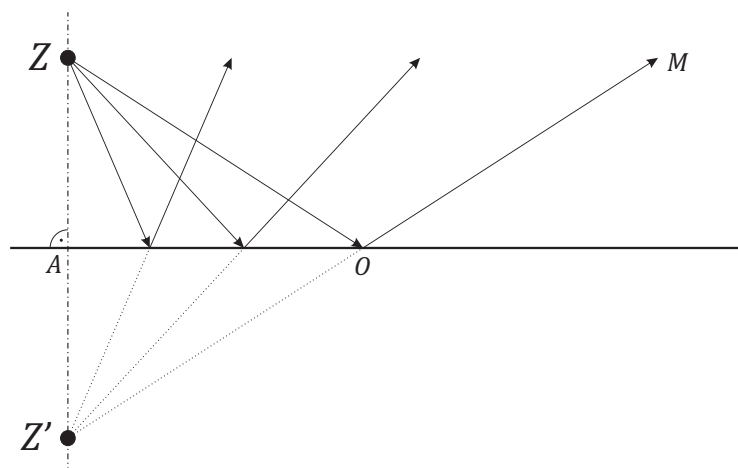


Obr. 1.7: Reálný odraz paprsku od povrchu určité drsnosti. [6]

1.4.1 Metoda zrcadlových zdrojů

Metoda, anglicky nazvaná „Image source method“ [5], je velice přesnou metodou geometrické akustiky. Využití této metody zaručuje nalezení všech paprsků až do určitého řádu odrazu.

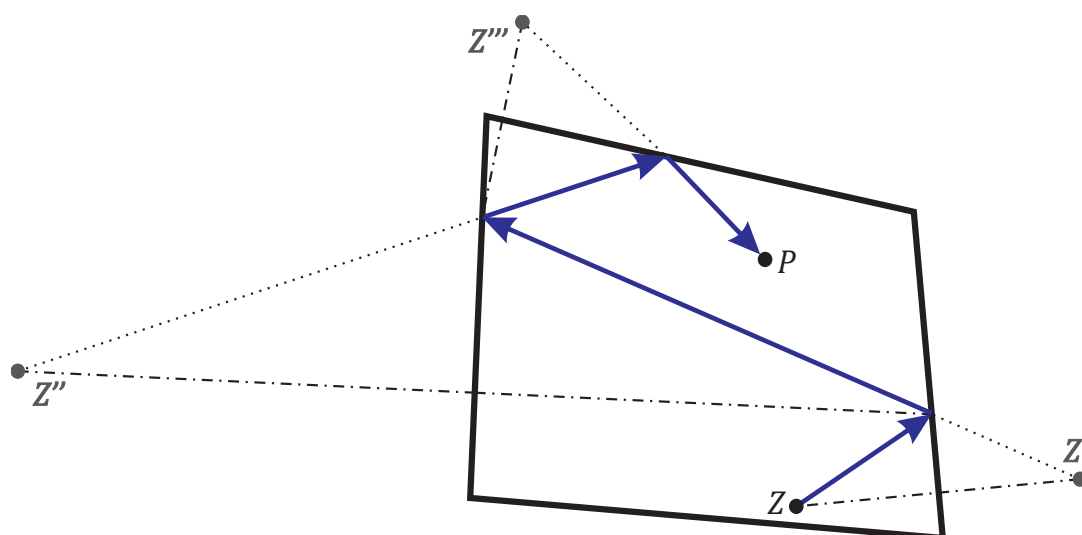
Výpočet odraženého paprsku od plochy je počítán tak, že se vytvoří zrcadlový obraz zdroje, kde osou tohoto zrcadlení je plocha sama. Takto vytvořeným zrcadlovým zdrojem je vedena přímka dále protínající bod vytvořený dopadem paprsku na rozhraní plochy (bod odrazu), obr. 1.8. Písmeno Z znázorňuje původní zdroj zvuku, Z' zrcadlový zdroj, A je bod v patě kolmice mezi původním zdrojem a daným povrchem, O je bod odrazu a M je odražený paprsek. Výpočet šířících se paprsků



Obr. 1.8: Metoda zrcadlových zdrojů. [6]

s několikanásobnými odrazy je zobrazen na obr. 1.9. Zde je znázorněno vytváření dalších zrcadlových zdrojů.

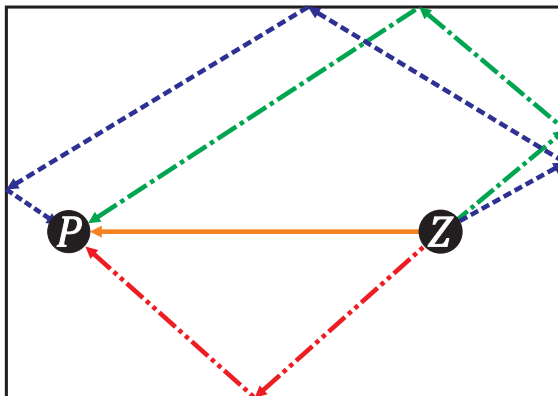
Tato metoda se v praxi většinou používá pouze pro výpočet paprsků nízkých frekvencí, jelikož paprsky těchto frekvencí (viz předcházející část) se odráží dle zákona dopadu a odrazu bez závislosti na drsnosti povrchu. Tyto nízké kmitočty zpravidla bývají shora ohraničeny dolním kritickým kmitočtem místnosti. Při použití této metody pro střední a vysoké kmitočty se neúměrně zvyšuje výpočetní náročnost, protože čím je odrazivý prostor složitější, tím exponenciálně roste výpočetní náročnost.



Obr. 1.9: Výpočet odražených paprsků metodou zrcadlových zdrojů. [5]

1.4.2 Metoda ray-tracing

Metoda ray-tracing je jednou z paprskových metod geometrické akustiky [5], která hledá cesty šířících se paprsků od zdroje signálu k přijímači. Metoda generuje paprsky vycházející z místa zdroje a sleduje jejich šíření v prostředí do doby, než paprsek dorazí do místa přijímače, viz obr. 1.10.



Obr. 1.10: Zkoumání paprsků pomocí metody ray-tracing. [5]

Výhodou této metody je jednoduchost sledování paprsku v prostředí [6]. Náročnost výpočtu je dána pouze náročností vyhledání průsečíku paprsku s povrchem stěny a jeho následným odrazem. Díky nalezení každého průsečíku paprsku a povrchu stěny je tato metoda velice obecná. Také vzhledem k možnosti řešit různé jevy při šíření – zrcadlový odraz, difuzní odraz nebo lom paprsku – je využití této metody poměrně široké. Tuto metodu lze jednoduše implementovat na prostory se zakřivenými plochami.

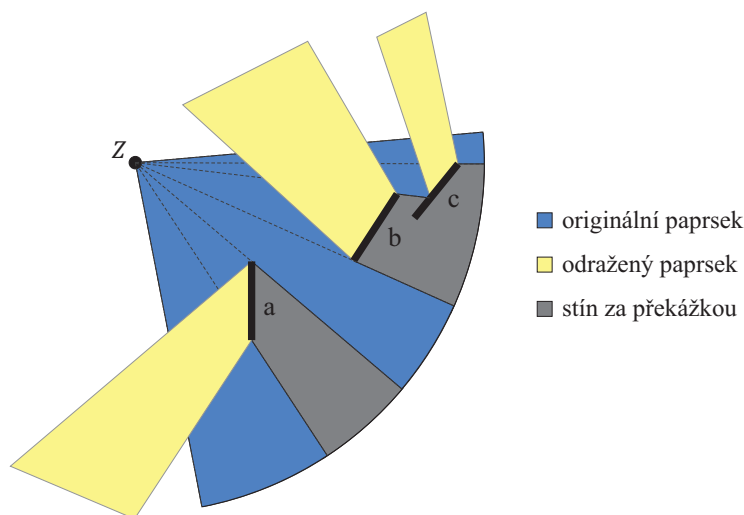
Primární nevýhodou metody je velká závislost náročnosti výpočtu na členitosti povrchů v daném prostoru, protože pro více ploch vzniká více odrazů. Tento problém se také projevuje pro četné difuzní odrazy. Dalším problémem je diskrétnost každého paprsku [5], anglicky „ray“. Výpočet probíhá pro každý paprsek zvlášť, proto mohou nastat situace, kdy je jedna cesta šíření počítána několikrát, čímž dochází k určité redundanci. Jelikož také výpočet probíhá pouze pro omezené množství paprsků, může dojít k situaci, kdy důležitá cesta paprsku nebude řešena. Tím může dojít ke zkreslení výsledků, například impulzní charakteristiky prostoru. Aby se proto minimalizovala pravděpodobnost velkých chyb, bývá volen velký počet paprsků, což ovšem vyžaduje velké množství výpočtů.

Tato metoda je dále při výpočtu omezena daným umístěním zdroje a přijímače, proto není použití této metody přímo vhodné pro použití v interaktivních aplikacích, kdy se poloha zdroje nebo přijímače může měnit.

1.4.3 Metoda beam-tracing

Metoda beam-tracing řadí cesty signálu šířícího se od zdroje do pyramidálních paprsků (tj. soubor paprsků uvažovaných metodou ray-tracing), které se dále šíří prostředím [5].

Každý z povrchů v prostoru se považuje za možný průsečík s paprskem šířícím se prostorem. Toto je znázorněno na obr. 1.11. Při nárazu šířeného paprsku na povrch překážky nebo stěny dochází k odrazu vlny, původní paprsek se ořízne dle překážky a za překážkou vznikne stín. Odražený paprsek má tvar zrcadleného stínu za překážkou, osou zrcadlení je překážka samotná. V případě, že jsou některé překážky řazeny za sebou, jak je tomu na obr. 1.11 u ploch „b“ a „c“, uvažují se tyto plochy postupně ve směru šířící se vlny tak, že žádný z následujících povrchů nebude uvažován, dokud předcházející, alespoň částečně absorbující povrchy, nebudou započítány.



Obr. 1.11: Ořezávání a odraz paprsku metody beam-tracing. [5]

Metoda je využívána v mnoha aplikacích, nejenom v modelování akustiky, ale také při výpočtech osvětlení, určování viditelnosti nebo například při předpovědích šíření rádiového signálu.

Výhodou metody beam-tracing je využití geometrické provázanosti, každý paprsek „beam“ zahrnuje několik paprsků „ray“ vycházejících ze stejného zdroje. Také jako metoda ray-tracing netrpí problémy s diskrétností vzorků, to znamená, že metoda nevynechává žádné možné cesty šíření signálu.

Hlavní nevýhodou je náročnost geometrických operací potřebných ke sledování paprsků této metody (ořezávání, průsečíky, atd.) ve 3D modelu, protože paprsky se mohou odrazit nebo oříznout na více površích. Díky této nevýhodě bývá častěji využíváno metody ray-tracing, jelikož její implementace je jednodušší.

2 MODELOVÁNÍ METODOU RAY-TRACING

V předcházející části (1.4.2) byla metoda ray-tracing popsána obecně, byly zde popsány základní vlastnosti metody s výčtem jejích kladných i záporných vlastností.

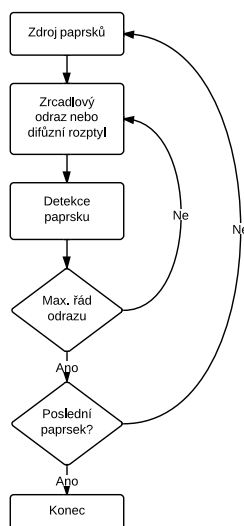
Tato kapitola se bude zabývat podrobněji metodou z pohledu její implementace v prostředí MATLAB.

2.1 Algoritmus Monte-Carlo

Monte-Carlo [6] je jedním z algoritmů používaných při výpočtu akustiky prostoru pomocí metody ray-tracing. Tuto metodu výpočtu používá například modelační program EASE[2].

Při výpočtu je vyzářeno z bodu zdroje N paprsků (N je zpravidla větší číslo než 10 000). Paprsky jsou generovány náhodně s rovnoměrným rozdělením a jsou rozloženy do všech směrů od zdroje paprsků. Každý paprsek je vyzářen s určitou počáteční akustickou energií E .

Výsledky této metody jsou odebírány pomocí detektoru (např. koule o poloměru r). Výsledky metody jsou ukládány jako hodnoty akustické energie společně s časovým zpožděním paprsku při průchodu detektorem.



Obr. 2.1: Algoritmus Monte-Carlo. [6]

Počáteční akustická energie paprsku se zmenšuje jak při šíření prostorem, tak při dopadu na stěnu. Absorbce energie stěnou může být počítána pomocí činitele α dle vzorce:

$$E_2 = E_1 * (1 - \alpha). \quad (2.1)$$

Při dopadu paprsku na stěnu je nutné rozhodnout, zda paprsek bude zrcadlově odražen, nebo bude odražen s difuzním rozptylem. Toto rozhodnutí závisí na náhodně generovaném čísle $z \in [0; 1]$. Paprsek je rozptýlen, pokud platí

$$z < \delta, \quad (2.2)$$

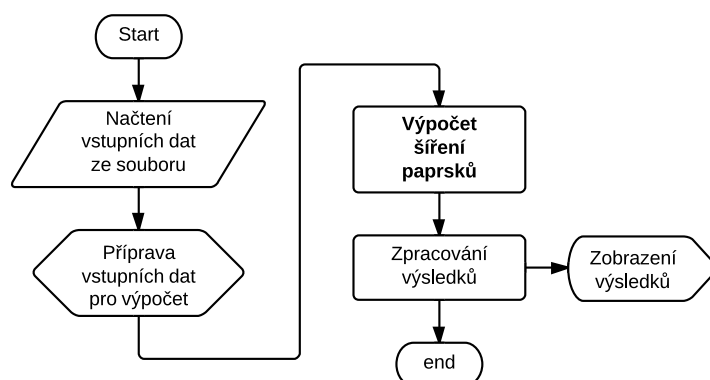
kde δ je dána vztahem [6]

$$\delta = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{total}}}. \quad (2.3)$$

2.2 Implementovaný algoritmus

Algoritmus použitý ve vytvořené aplikaci vychází z metody Monte-Carlo, avšak není zde řešen rozptyl paprsků při dopadu na stěnu.

Na obr. 2.2 je vývojový diagram zobrazující základní pracovní části aplikace.

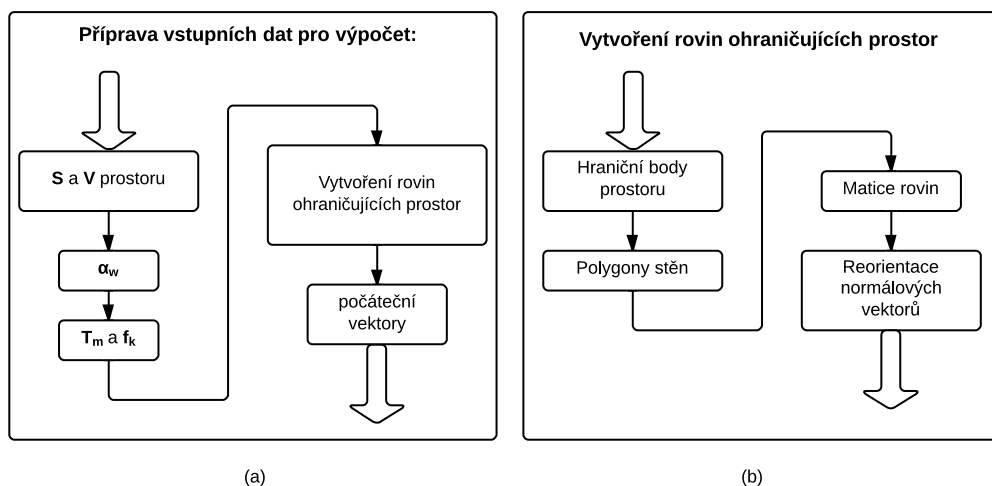


Obr. 2.2: Základní části implementovaného algoritmu.

2.2.1 Vstupní data

Vstupními parametry jsou:

- základní rozměry počítaného prostoru – šířka, hloubka a výška,
- poloha zdroje zvuku T_x ,
- poloha posluchače R_x ,
- počet řešených paprsků n ,
- maximální řád odrazu o ,
- maximální pokles hladiny intenzity v dB,
- střední frekvence řešených oktávových pásem,
- činitel zvukové pohltivosti α_p ,
- vektor přiřazující jednotlivé pohltivosti α_p jednotlivým stěnám.



Obr. 2.3: Použité části algoritmu.

2.2.2 Příprava vstupních dat

Vstupní data načtená ze souboru „in.m“ je nutné upravit do podoby potřebné k výpočtu. Tento postup je zobrazen na obr. 2.3 (a).

Prvním krokem v přípravě parametrů k výpočtu je výpočet objemu místnosti a výpočet obsahu povrchů stěn. Tyto parametry jsou nutné k výpočtu doby dozvuku T_M a kritického kmitočtu f_k . Dále je k výpočtu doby dozvuku potřeba vypočítat širokopásmový činitel zvukové pohltivosti α_w ze zadaných hodnot činitele α_p , přepočet byl popsán v kapitole 1.3.1. Po této přípravě vypočítáme dobu dozvuku dle vzorce (1.23) a kritický kmitočet místnosti dle vzorce (1.24).

Následujícím krokem je analytické vytvoření virtuálního prostoru za pomoci obecných rovnic rovin.

Vytvoření prostoru

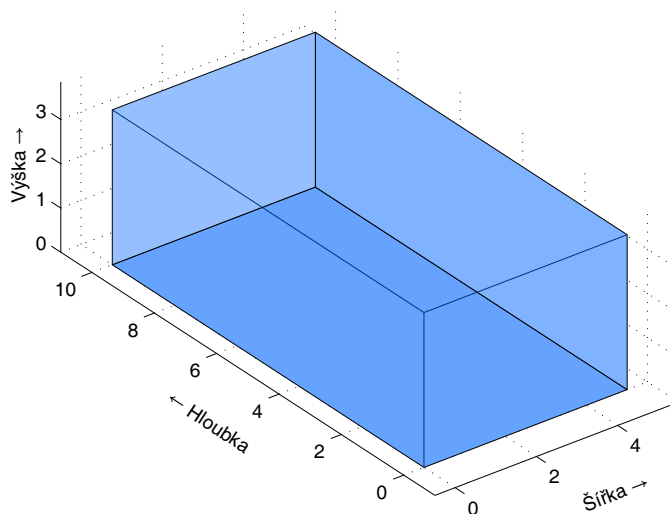
Prostor je možné vytvořit pomocí analytické geometrie pomocí obecných rovnic rovin, ale je nutné znát souřadnice všech hraničních bodů prostoru. Tyto souřadnice lze jednoduše vypočítat z rozměrů prostoru.

Po vytvoření hraničních bodů, je nutné vytvořit tzv. polygony stěn, které obsahují souřadnice bodů ohraničujících danou stěnu. Pro každou stěnu vzniknou tři polygony – X, Y a Z. Například polygon X obsahuje souřadnice x všech bodů stěny.

Obecná rovnice roviny, popsaná v literatuře[1] má tvar:

$$ax + by + cz + d = 0, \quad (2.4)$$

jejíž koeficienty a, b a c jsou normálovým vektorem roviny $\vec{n}(a, b, c)$. Obecnou rovnici lze sestavit za pomoci tří bodů ležících na dané rovině (v mém případě stěně).



Obr. 2.4: Vytvářený prostor.

Ze tří hraničních bodů stěny $K[k_1, k_2, k_3]$, $L[l_1, l_2, l_3]$ a $M[m_1, m_2, m_3]$ můžeme vypočítat dva navzájem různoběžné vektory \vec{KL} a \vec{LM} . Pomocí vektorového součinu z těchto vektorů získáme normálový vektor roviny \vec{n} . Dosazením normálového vektoru a libovolného hraničního bodu stěny do rovnice roviny vypočítáme její koeficient d , čímž máme obecnou rovnici roviny kompletní. Tento postup opakujeme pro každou ze stěn.

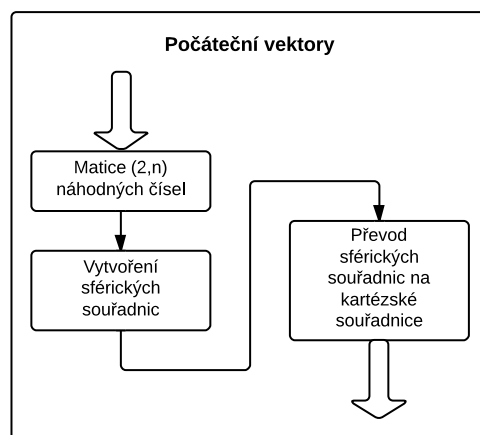
Posledním bodem důležitým pro další výpočty je zjistit směr normálových vektorů rovin a případně je přeorientovat, aby směřovaly dovnitř prostoru. K tomu je potřeba znát střed prostoru S .

Zda normálový vektor směřuje dovnitř prostoru zjistíme tak, že do obecné rovnice roviny dosadíme střed prostoru S . Pokud je výsledná hodnota větší než nula, pak bod S leží v kladném poloprostoru od roviny. Normálový vektor směřuje dovnitř prostoru. Pokud směřuje opačným směrem, je nutné vynásobit normálový vektor hodnotou (-1) .

Postup při tvorbě prostoru je graficky zobrazen na vývojovém diagramu na obr. 2.3 (b).

Počáteční vektory

Z místa zdroje se zvuk šíří všemi směry, proto je nutné vytvořit soubor paprsků vycházejících z počátku souřadnicového systému, který je náhodně rozptýlen do všech směrů. Tyto paprsky jsou reprezentované směrovými vektory. Postup je znázorněn na vývojové diagramu obr. 2.5.



Obr. 2.5: Vytvoření počátečních vektorů.

Vstupním parametrem nutným pro tento výpočet je počet vyslaných paprsků z místa zdroje n . Pro tento počet parsků je nutné vytvořit matici náhodných čísel o velikosti $(2, n)$. Náhodná čísla musí být generována s rovnoměrným rozložením (MATLAB – funkce `rand()`).

Za pomoci vygenerovaných náhodných čísel vytvoříme souřadnice sférického systému souřadnic θ a φ . Jako poloměr dosadíme jakékoli kladné číslo, např. $r = 1$.

Posledním krokem je převod sférických souřadnic na souřadnice kartézské. Tento převod je v MATLABu jednoduše realizován funkcí `sph2cart()`.

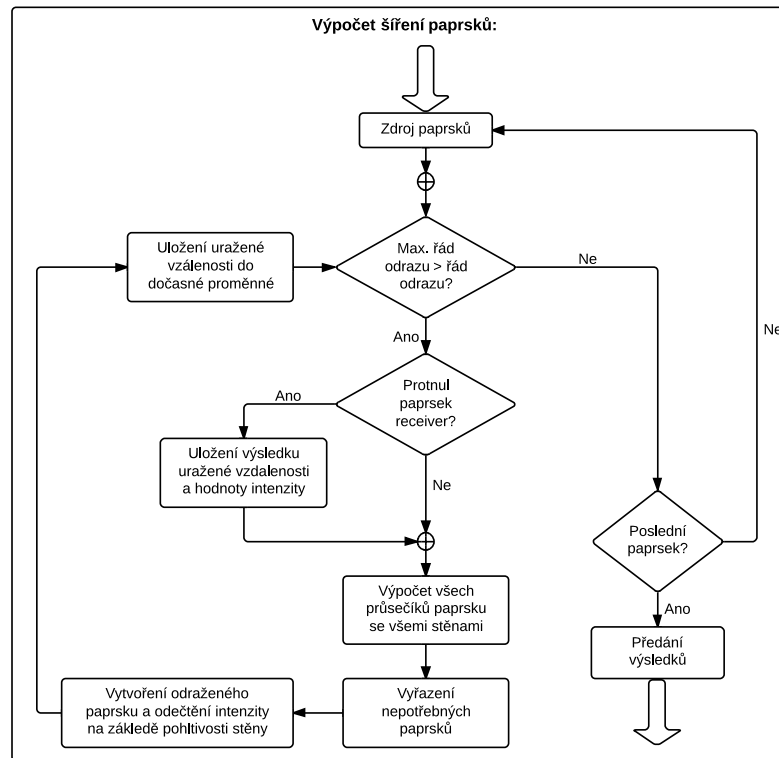
Kód funkce „pocatecni_vektory“ vytvořené v MATLABu:

```

function [vektory]=pocatecni_vektory(n)
    m=rand(2,n);           %generování náhodných čísel
    theta=m(1,:)*(2*pi);   %vytvoření úhlu theta
    varphi=m(2,:)*(2*pi);  %vytvoření úhlu varphi
    r=zeros(1,n)1;         %vytvoření poloměru 1
    [vektory(:,1),vektory(:,2),vektory(:,3)]=sph2cart(theta,phi,r);
                           %prevod ze sferickych souradnic
  
```

2.2.3 Výpočet šíření paprsků

V předchozí kapitole jsem popsal způsob přípravy vstupních dat nutný pro zahájení výpočtu šíření paprsků. V této kapitole popíši postup při šíření paprsků a při odečítání výsledků. Jelikož je popis vývojovým diagramem přehlednější než písemný popis, tak popíši jen některé prvky z diagramu obr. 2.6.



Obr. 2.6: Algoritmus sledování šíření paprsků prostorem.

Detekce paprsků

Jak je popsáno v algoritmu MonteCarlo 2.1, přijímačem může být jakýkoliv bod, rovina, objekt. V mém skriptu jsem použil kouli o průměru 20 cm, což přibližně odpovídá průměru lidské hlavy. Tato koule je vytvořena analyticky pomocí rovnice kulové plochy [1]

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2, \quad (2.5)$$

kde r je poloměr kulové plochy. Tato rovnice ovšem popisuje kulovou plochu se středem v počátku souřadnic. Pro popis koule umístěné v bodě $Rx[m, n, q]$ je nutné tuto rovnici upravit do tvaru

$$(x - m)^2 + (y - n)^2 + (z - q)^2 = r^2. \quad (2.6)$$

Pokud námi řešený paprsek protne tuto kouli, je do výstupní proměnné zapsána hodnota celkové vzdálenosti uražené paprskem od zdroje až do místa průsečíku. Společně s touto hodnotou je zaznamenána aktuální intenzita paprsku pro všechny pásma činitele zvukové pohltivosti – je započítán úbytek intenzity při šíření vzduchem dle vzorce (1.4) a úbytek způsobený pohltivostí stěn.

Vyřazení nepotřebných průsečíků

Při výpočtu všech průsečíků paprsků se stěnami získáme šest výsledků, ale důležitý je pro nás pouze jeden.

Pokud budeme průsečíky filtrovat podle následujících podmínek, získáme pouze jeden, námi hledaný průsečík[6].

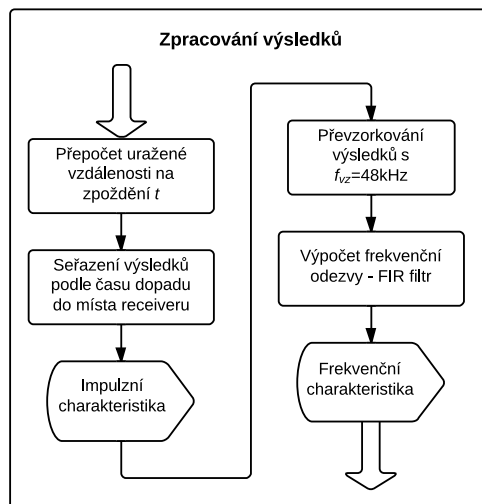
- 1) Je nutné vyřadit průsečík se stěnou, na které se paprsek odrazil v předchozím kroku (neplatí pro první odraz),
- 2) průsečík musí ležet na kladné polopřímce (ležet ve správném směru šíření),
- 3) nejbližší ze zbylých průsečíků k pozici zdroje je námi hledaný průsečík.

2.2.4 Zpracování výsledků

Vypočítané výsledky je třeba upravit do výstupní formy. Touto formou je impulzní a frekvenční charakteristika řešeného prostoru.

První úpravou výsledků je přepočítání vzdálenosti, kterou paprsek urazil před detekováním, na časové zpoždění. Následuje seřazení výsledků podle času zpoždění. Z těchto výsledků lze již jednoduše vykreslit impulzní charakteristiku.

Pro zobrazení frekvenční charakteristiky je nutné soubor výsledků převzorkovat (v mém případě s $f_{vz} = 48 \text{ kHz}$). Výpočet frekvenční charakteristiky z impulzní odezvy je řešen pomocí funkce MATLABu – `freqz()`.



Obr. 2.7: Zpracování a zobrazení výsledků.

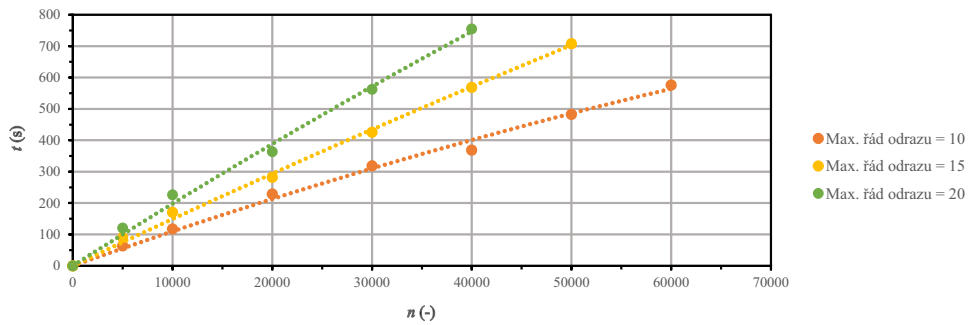
2.3 Modelování prostoru

Vytvořenou aplikací jsem modeloval vlastnosti zvoleného prostoru o rozměrech $5\text{ m} \times 10\text{ m} \times 3,5\text{ m}$ a porovnal jsem výsledky doby výpočtu a počtu detekovaných paprsků pro maximální řády odrazu 10, 15 a 20. Zvolené parametry modelovaného prostoru jsou uvedeny v příloze B.1.

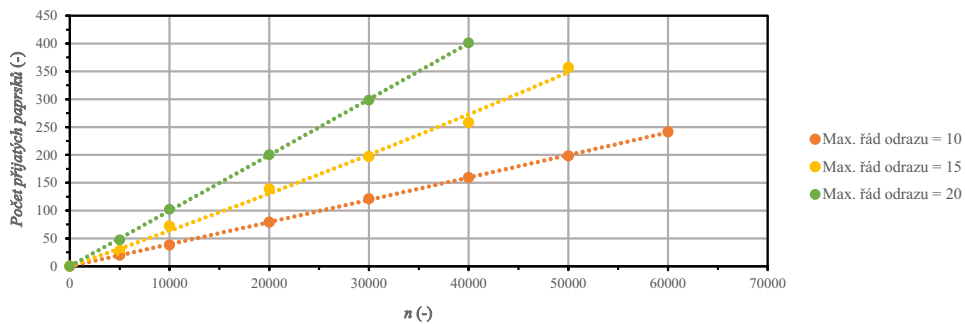
Při modelování jsou výpočty několikrát opakovány z důvodu odstranění nepřesností výpočtů způsobených náhodnými počátečními paprsky – paprsek se při dvou po sobě následujících výpočtech nešíří stejnou cestou.

Výsledky těchto výpočtů jsou zobrazeny v příloze. Jsou zde vypsány doby trvání výpočtu a počty detekovaných paprsků. Dále jsou v příloze vyobrazeny vypočítané impulzní, frekvenční charakteristiky a 3D zobrazení místnosti s detekovanými paprsky. Výpočty pro maximální řád odrazu 10 jsou umístěny v příloze B.2, pro maximální řád 15 jsou v příloze B.3 a pro maximální řád 20 jsou v příloze B.4.

Na obr. 2.8 a obr. 2.9 jsou vyobrazeny závislosti doby výpočtu a počtu detekovaných paprsků na počtu počátečních paprsků pro různé maximální řády odrazu.



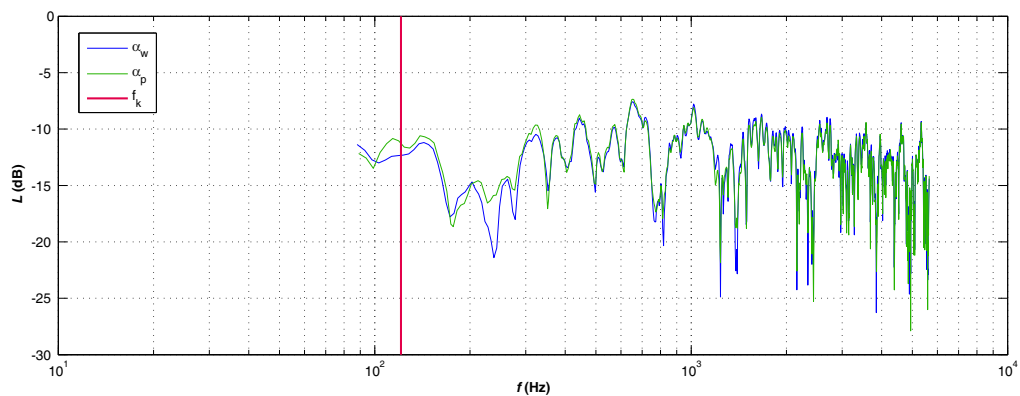
Obr. 2.8: Závislost průměrné doby výpočtu na počtu paprsků.



Obr. 2.9: Závislosti průměrného počtu detekovaných na počtu vyslaných paprsků.

V aplikaci je výsledná frekvenční charakteristika prostoru řešena tak, že se z impulzních odezev vypočítaných pro daná pásma α_p vypočítají jednotlivé frekvenční charakteristiky platné jen pro určité oktaóvové pásmo. Tato dílčí pásma jsou poté

složena do výsledné frekvenční odezvy platné pro celé dané frekvenční pásmo. Pro porovnání jsem vypočítal frekvenční charakteristiku z impulzní odezvy prostoru počítanou s širokopásmovým činitelem α_w . Na obr. 2.10 jsou zobrazeny oba průběhy pro simulovaný prostor, maximální řád odrazu 20 a 40000 vyslaných paprsků.



Obr. 2.10: Porovnání frekvenčních charakteristik vypočtených z hodnot α_w a α_p .

3 ZÁVĚR

V této práci jsem popsal základní vlastnosti šíření zvuku prostorem, základy akustiky uzavřených prostorů a metody pro zkoumání akustických vlastností těchto prostorů.

Pro modelování akustiky uzavřené regulární místnosti jsem vytvořil aplikaci v prostředí MATLAB. Tato aplikace pracuje na základě geometrické akustiky využívající metodu ray-tracing.

Algoritmus aplikace vychází z algoritmu Monte-Carlo, který sleduje paprsek při šíření prostorem a při dopadu na stěnu. Na základě porovnání náhodného čísla s vypočtenou hodnotou koeficientu stěny se poté rozhoduje, zda bude paprsek odražen či rozptýlen. Ve vytvořené aplikaci je počítáno pouze s odrazem paprsku.

Vytvořená aplikace načítá data ze vstupního souboru a po jejich zpracování začíná s výpočtem šíření paprsku. Paprsky se šíří ze zadané pozice zdroje paprsků všemi směry a jsou generovány náhodně s rovnoměrným rozložením. Paprsky jsou sledovány při šíření prostorem – je zaznamenáván útlum intenzity na základě uražené vzdálenosti a na základě odrazu od stěny prostoru. Výsledky jednotlivých paprsků jsou ukládány ve chvíli, kdy je paprsek detekován v místě posluchače a zaznamená se jeho hodnoty intenzity a uražené vzdálenosti paprsku. Sledování probíhá do doby, než intenzita paprsku poklesne pod definovanou mez, nebo než paprsek dosáhne maximálního odrazu.

Výsledky aplikace jsou zobrazeny po skončení výpočtu jako impulzní a frekvenční charakteristika prostoru a trojrozměrné zobrazení prostoru s vyobrazenými detekovanými paprsky.

Prostřednictvím aplikace jsem provedl simulace náhodně zvoleného prostoru. Simulace probíhaly pro různé počty paprsků a pro různé maximální řády odrazu. Výsledky těchto simulací jsou součástí této práce a jsou vyobrazeny v příloze B.

Při dalším zkoumání této problematiky by bylo možné do aplikace implementovat již zmiňovaný rozptyl paprsků při dopadu na stěnu nebo zkrátit dobu výpočtu implementováním paralelně počítaných operací, což by umožnilo řešit větší soubory počátečních paprsků a docílit tím vyšší přesnosti výsledků.

LITERATURA

- [1] BUDINSKÝ, Bruno. *Analytická a diferenciální geometrie*. Vyd. 1. Praha : SNTL, 1983. 296 s.
- [2] Calculations for in-depth reflection analysis: Stochastic and Deterministic Ray Tracing methods. In: *Afmng.eu* [online]. © 2011-2013 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://ease.afmng.eu/index.php/in-depth-reflection-analysis.html>
- [3] ČSN EN ISO 11654. *Akustika – Absorbéry zvuku používané v budovách – Hodnocení zvukové pohltivosti*. Praha : Český normalizační institut, Prosinec 1998. 13 s.
- [4] ČSN 73 0525. *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*. Praha : Český normalizační institut, Únor 1998. 20 s.
- [5] FUNKHOUSER, Thomas, et al. A beam tracing method for interactive architectural acoustic. *Journal of the Acoustical Society of America* [online]. February 2004, 2, [cit. 2011-11-26]. s. 739-756. Dostupný z WWW: <<http://www.cs.princeton.edu/~min/publications/funk04.pdf>>.
- [6] MECHEL, Fridolin P. *Formulas of Acoustics*. 2nd edition. Berlin Heidelberg New York : Springer Science+Business Media, 2008. 1275 s. ISBN 978-3-540-76832-6.
- [7] ORLOVSKÝ, Kristián. *Simulace poslechového prostoru, azimutu a vzdálenosti zvukového zdroje pro vícekanálové ozvučovací systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Balík, Ph.D..
- [8] SCHIMMEL, Jiří. *Elektroakustika*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií - Ústav telekomunikací, 2013. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [9] ŠKVOR, Zdeněk. *Akustika a elektroakustika*. Vyd. 1. Praha : Akademie věd České republiky, 2001. 527 s. ISBN 80-200-0461-0.
- [10] ŠŤASTNÍK, Stanislav; ZACH, Jiří. *Stavební akustika a zvukoizolační materiály*. Vydavatelem je fakulta Stavební, Vysoké učení technické v Brně. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 209 s. ISBN 80-214-2117-7.
- [11] KAŇKA, Jan. *Akustika stavebních objektů*. 1. vyd. Brno: Era, 2009, 145 s. ISBN 978-80-7366-140-3.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

f	kmitočet
f_k	kritický kmitočet místnosti
E_3	euklidovský trojrozměrný prostor
E	zvuková energie
E_0	odražená zvuková energie
E_P	pohlčená zvuková energie
E_R	rozptýlená zvuková energie
c_0	rychlost zvuku
V	objem
S	obsah
L	celková délka stran
α	činitel zvukové pohltivosti
α_s	změřený činitel zvukové pohltivosti
α_p	praktický činitel zvukové pohltivosti
α_w	vážený činitel zvukové pohltivosti
A	pohltivost uzavřeného prostoru
t	čas
T_{60}	doba dozvuku, pokles o 60dB
T_S	doba dozvuku podle Sabina
T_E	doba dozvuku podle Eyringa
T_M	doba dozvuku podle Millingtona
T_{30}	doba dozvuku, pokles o 30dB
T_{20}	doba dozvuku, pokles o 20dB

SEZNAM PŘÍLOH

A Akustika uzavřeného prostoru	38
A.1 Hodnoty oktávových a třetinooktávových pásen	38
A.2 Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α_p pro vybrané materiály	38
B Simulace	39
B.1 Vstupní data	39
B.2 Výsledky – výpočet do 10. řádu odrazu	40
B.2.1 Tabulka výsledků	40
B.2.2 Výsledné charakteristiky	41
B.2.3 Zobrazení detekovaných paprsků	44
B.3 Výsledky – výpočet do 15. řádu odrazu	46
B.3.1 Tabulka výsledků	46
B.3.2 Výsledné charakteristiky	47
B.3.3 Zobrazení detekovaných paprsků	50
B.4 Výsledky – výpočet do 20. řádu odrazu	51
B.4.1 Tabulka výsledků	51
B.4.2 Výsledné charakteristiky	52
B.4.3 Zobrazení detekovaných paprsků	55
C Návod k použití aplikace	56
D Obsah přiloženého CD	57

A AKUSTIKA UZAVŘENÉHO PROSTORU

A.1 Hodnoty oktavových a třetinooktavových pásem

$f_{3rd\ oct.}$	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
$f_{oct.}$	31,5			63			125			250		
$f_{3rd\ oct.}$	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$f_{oct.}$	500			1000			2000			4000		

A.2 Hodnoty činitele zvukové pohltivosti α_p pro vybrané materiály

No.	Materiál	125	250	500	1000	2000	4000
1	Beton	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
2	Omítnutá cihlová zeď	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.11
3	Dřevěný lakovaný obklad	0.12	0.10	0.06	0.05	0.05	0.06
4	Sklo	0.12	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02
5	Závěs	0.05	0.06	0.09	0.12	0.18	0.22
6	Jekor	0.08	0.09	0.12	0.18	0.30	0.33
7	Sádrokarton (akustický)	0.10	0.15	0.35	0.60	0.50	0.30
8	Sádrokarton	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

B SIMULACE

B.1 Vstupní data

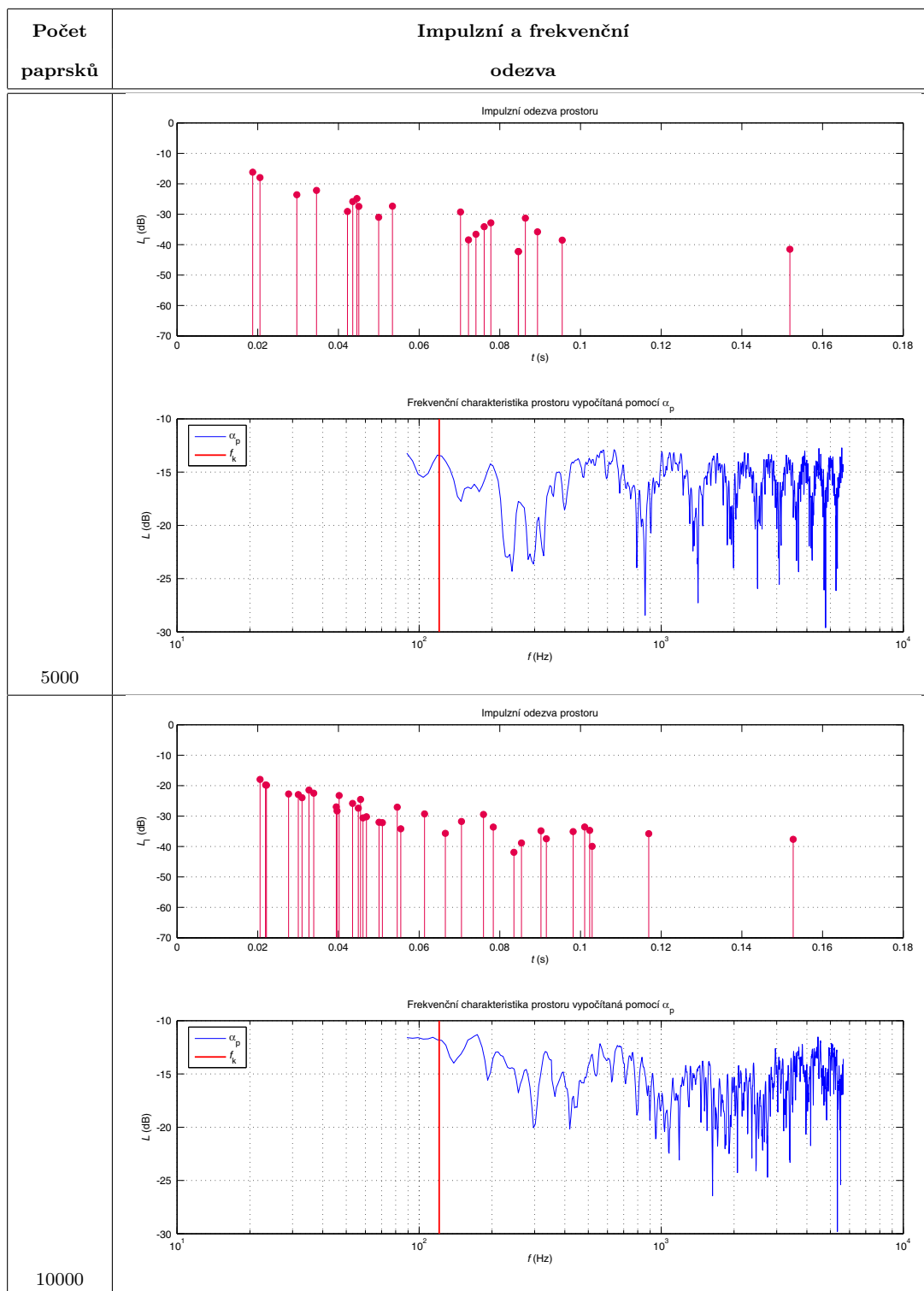
Šířka místnosti	(m)	5
Hloubka místnosti	(m)	10
Výška místnosti	(m)	3,5
Počet paprsků	(-)	5000, 10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000
Maximální řád odrazu	(-)	10, 15, 20
Maximální úbytek intenzity paprsku	(dB)	-65
Vektor přiřazení α_p stěně	(-)	[6, 7, 5, 2, 4, 3] (pozn. odpovídá hodnotám v příloze A.2)

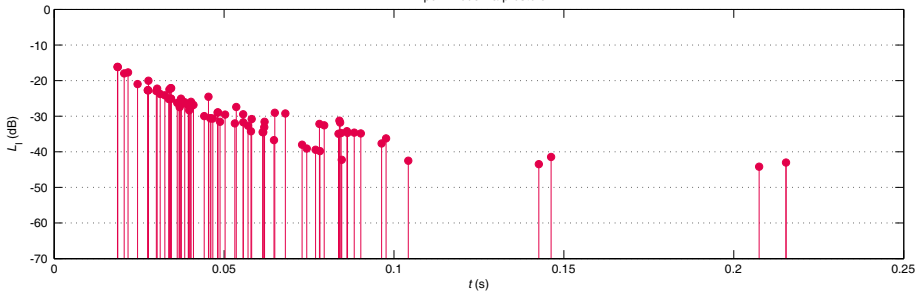
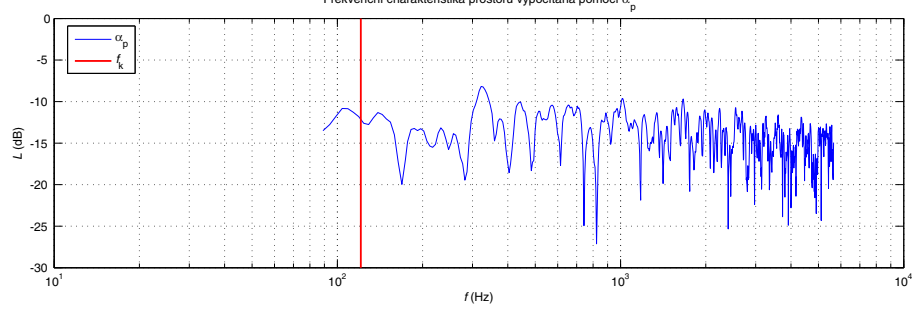
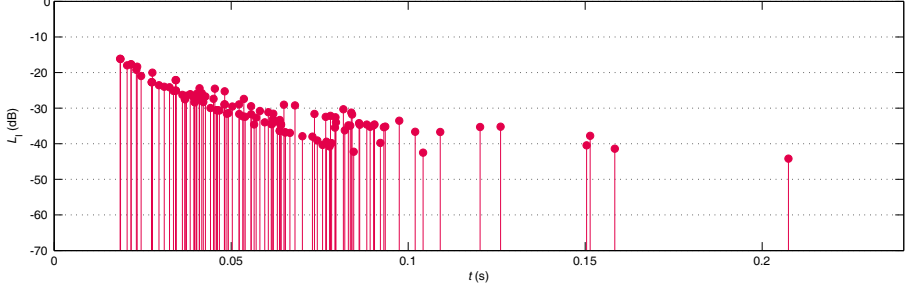
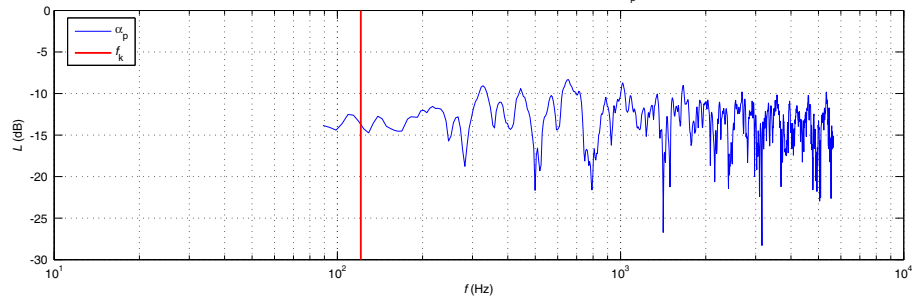
B.2 Výsledky – výpočet do 10. řádu odrazu

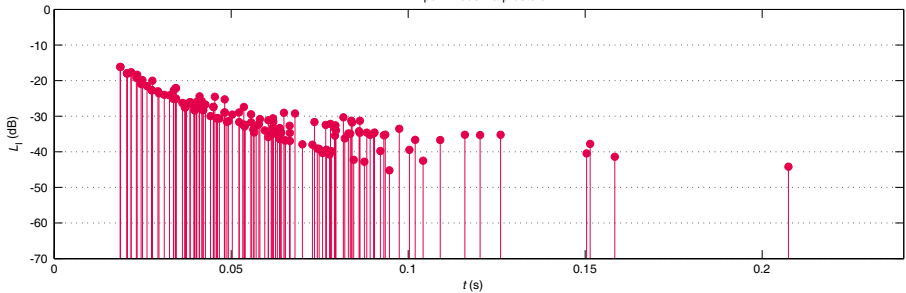
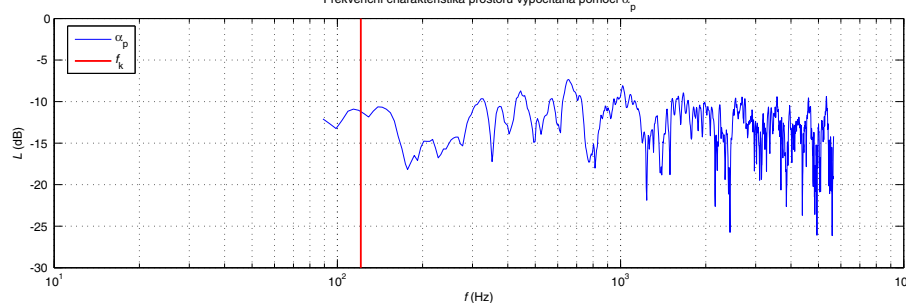
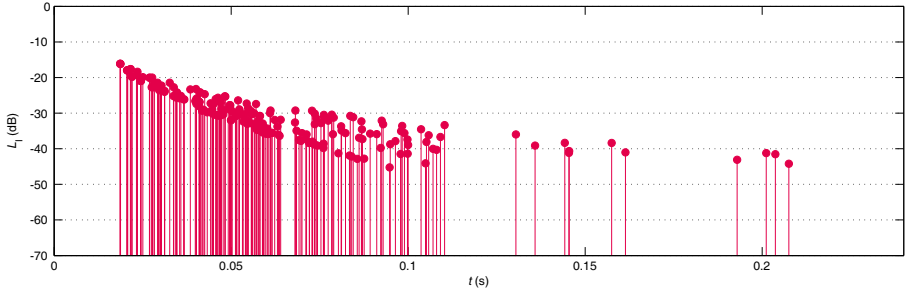
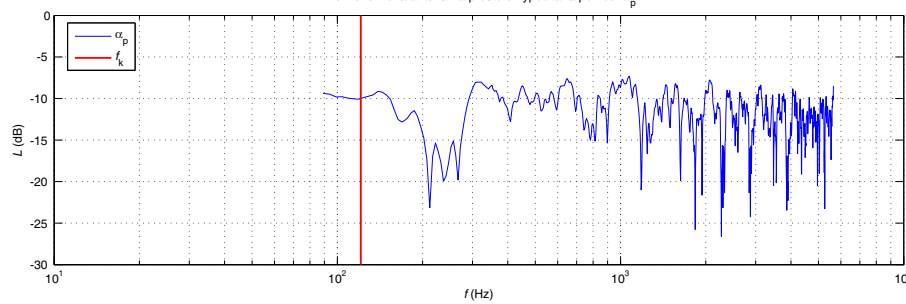
B.2.1 Tabulka výsledků

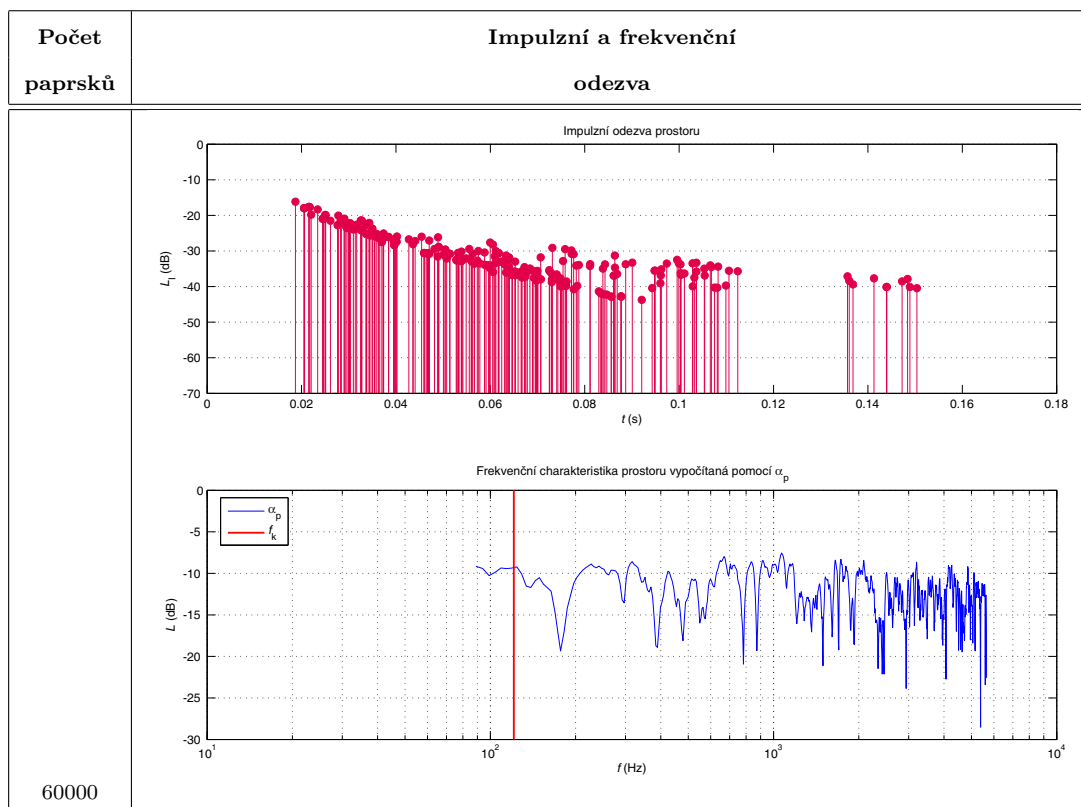
No.	Počet paprsků	Doba výpočtu	Průměrná doba výpočtu	Počet přijatých paprsků	Průměrný počet přijatých paprsků
(-)	(-)	(s)	(s)	(-)	(-)
1	5000	65,21	63,52	21	20
2		62,59		18	
3		64,45		21	
4		62,23		21	
5	10000	113,62	117,40	37	38
6		113,90		36	
7		115,81		39	
8		126,28		39	
9	20000	225,36	228,65	88	79
10		228,78		79	
11		227,36		79	
12		233,09		68	
13	30000	267,87	318,50	120	121
14		399,97		129	
15		337,30		115	
16		268,88		118	
17	40000	367,16	368,75	147	159
18		371,84		171	
19		373,00		147	
20		362,99		169	
21	50000	512,08	482,47	209	198
22		468,75		198	
23		467,03		198	
24		482,03		186	
25	60000	567,60	575,68	232	241
26		570,65		253	
27		567,22		264	
28		597,25		215	

B.2.2 Výsledné charakteristiky

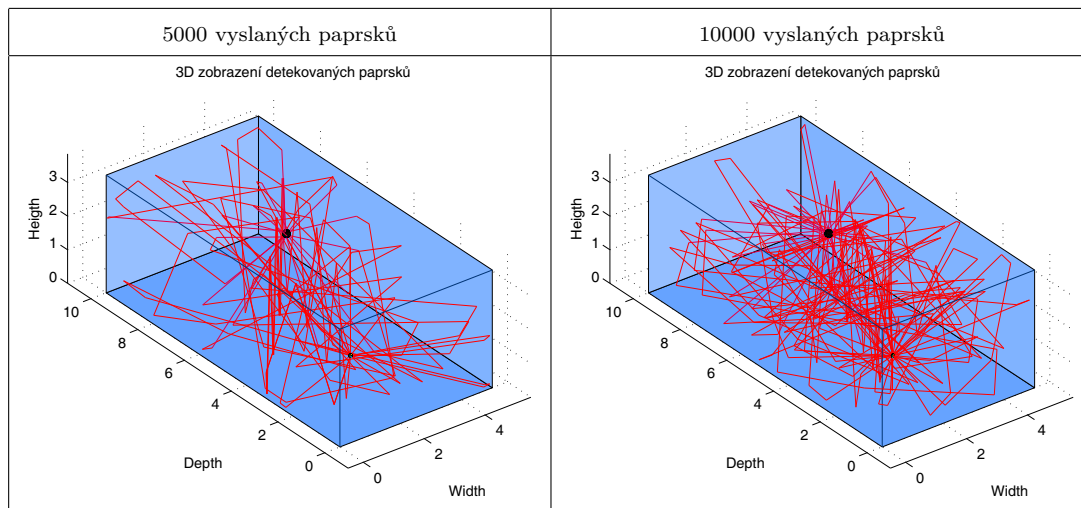


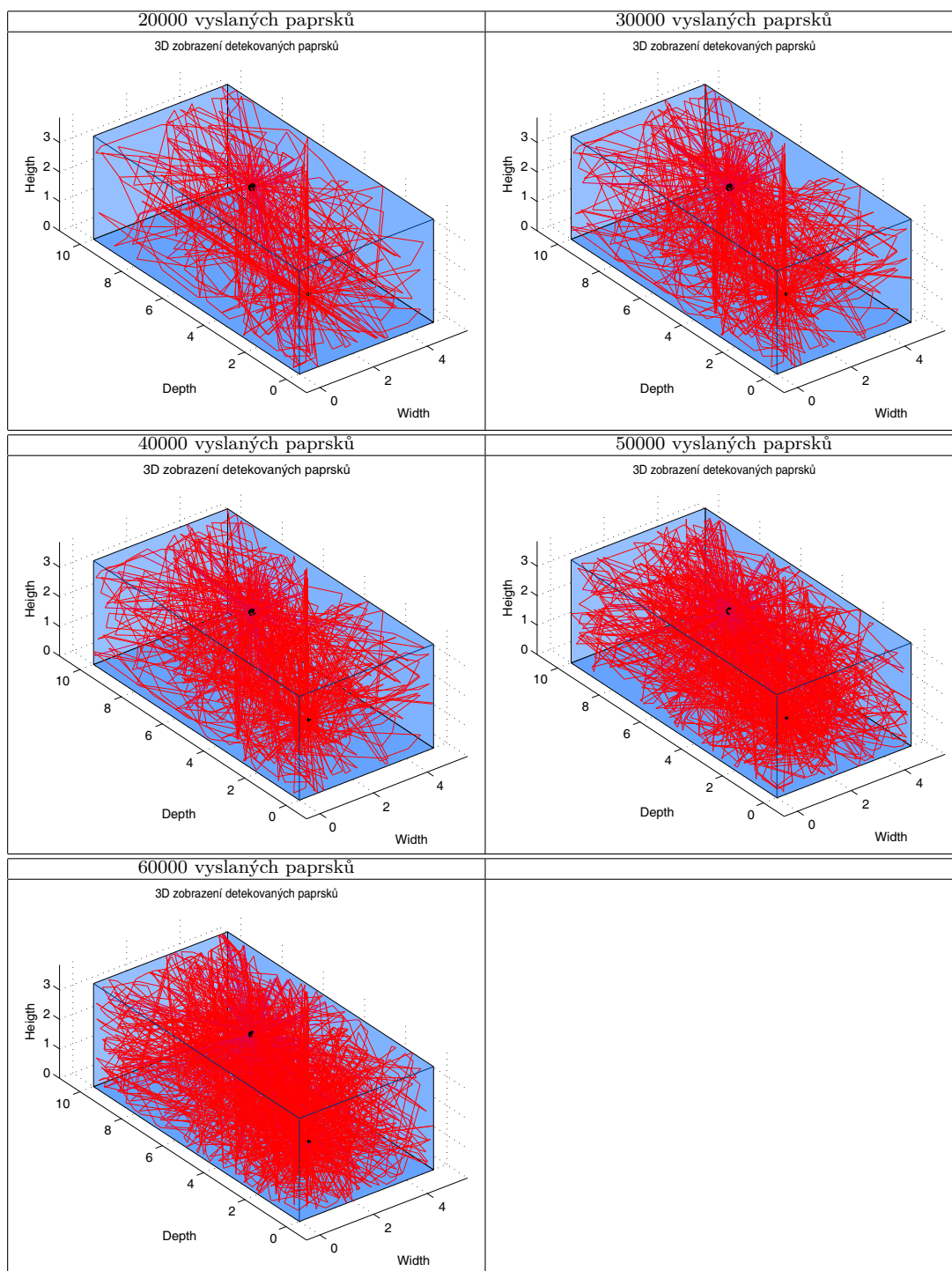
Počet paprsků	Impulzní a frekvenční odezva
20000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 
30000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 

Počet paprsků	Impulzní a frekvenční odezva
40000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 
50000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 



B.2.3 Zobrazení detekovaných paprsků



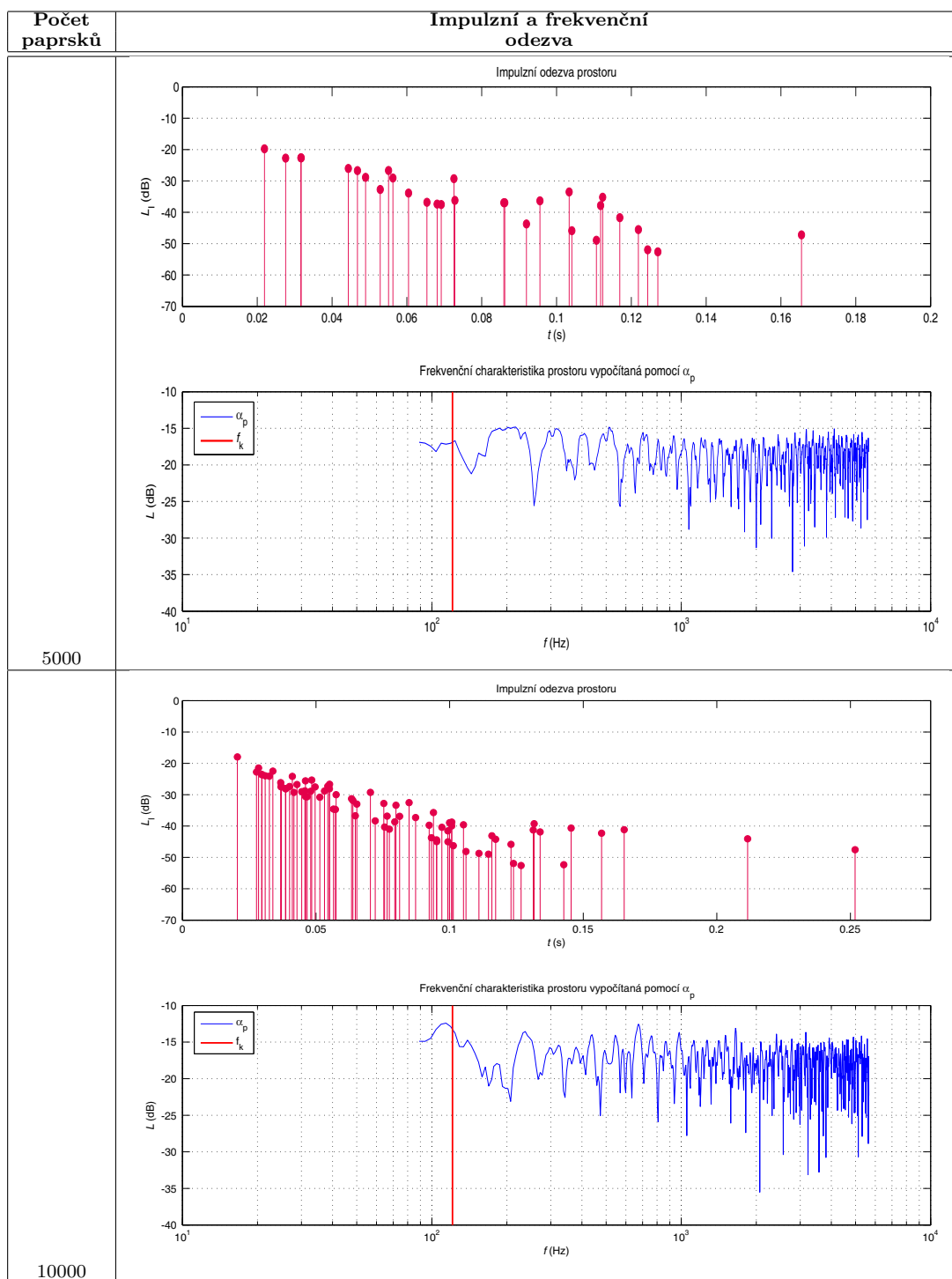


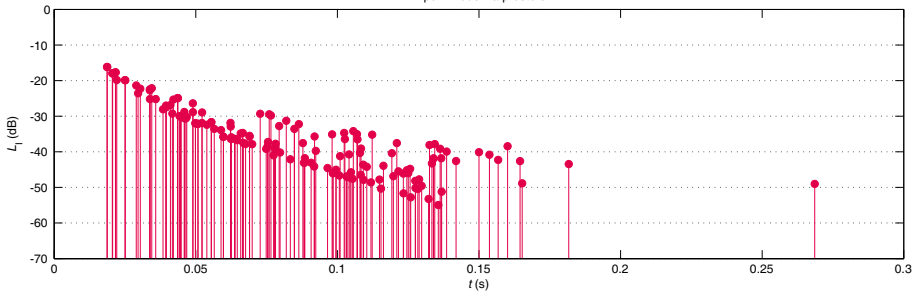
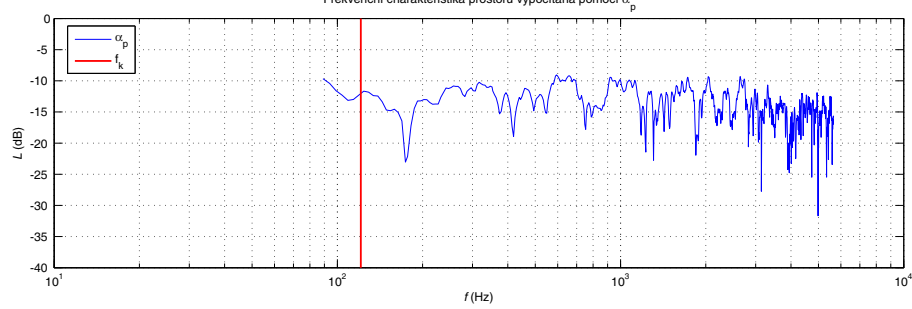
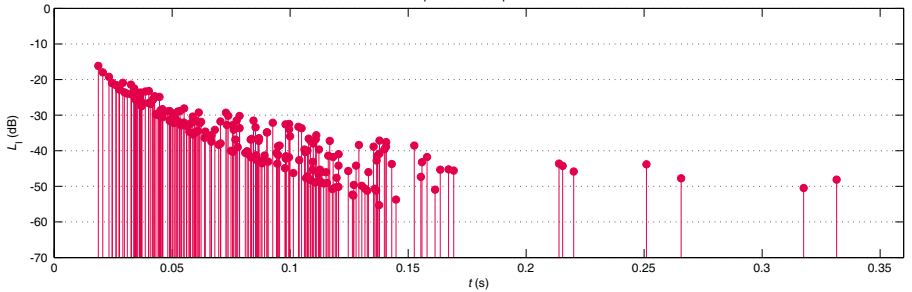
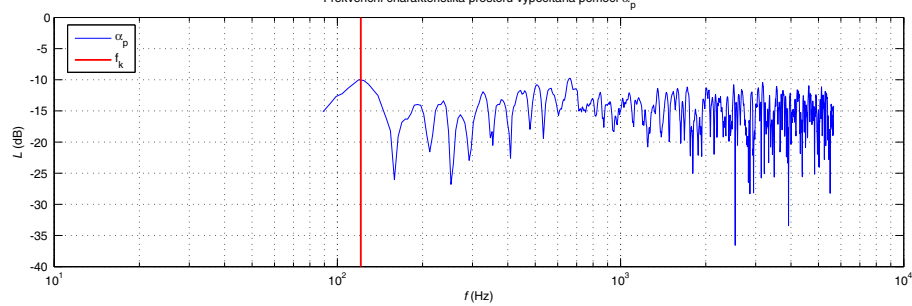
B.3 Výsledky – výpočet do 15. řádu odrazu

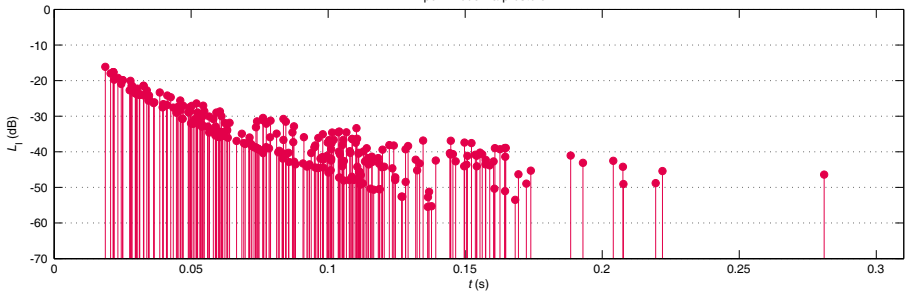
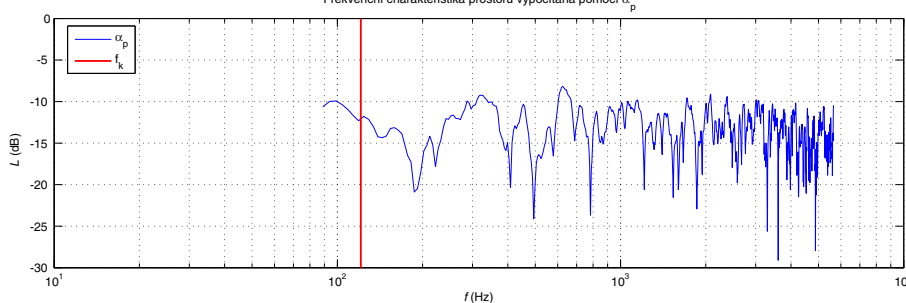
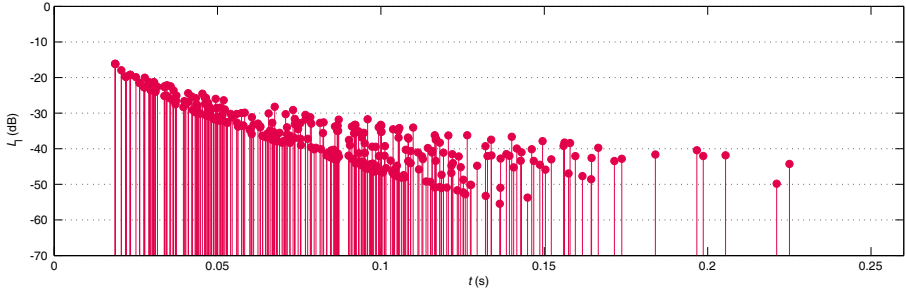
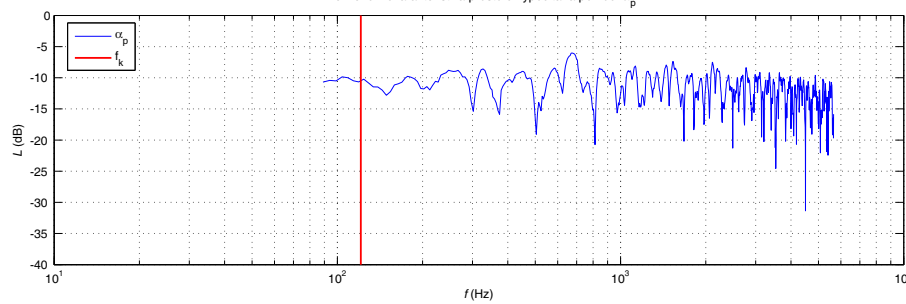
B.3.1 Tabulka výsledků

No.	Počet paprsků	Doba výpočtu	Průměrná doba výpočtu	Počet přijatých paprsků	Průměrný počet přijatých paprsků
(-)	(-)	(s)	(s)	(-)	(-)
1	5000	87,45	90,97	30	28
2		93,82		26	
3		91,65		29	
4	10000	178,49	170,87	75	72
5		172,91		78	
6		161,21		64	
7	20000	287,14	282,22	119	139
8		280,00		115	
9		279,52		143	
10	30000	415,21	425,80	206	197
11		429,41		219	
12		432,77		166	
13	40000	587,14	568,42	270	258
14		586,48		252	
15		531,64		252	
16	50000	706,94	707,67	374	357
17		706,71		367	
18		709,38		331	

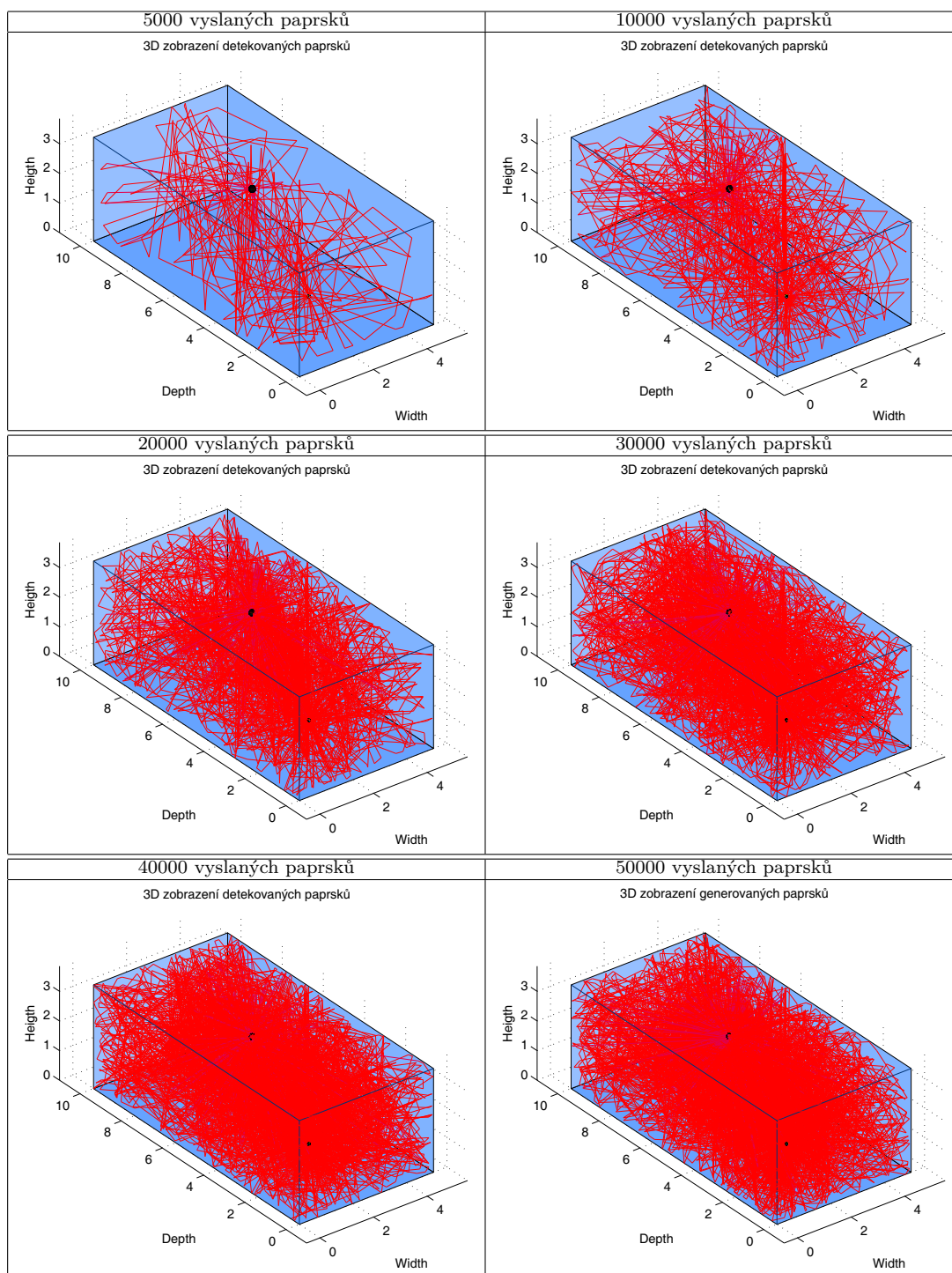
B.3.2 Výsledné charakteristiky



Počet paprsků	Impulzní a frekvenční odezva
20000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 
30000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 

Počet paprsků	Impulzní a frekvenční odezva
40000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 
50000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 

B.3.3 Zobrazení detekovaných paprsků

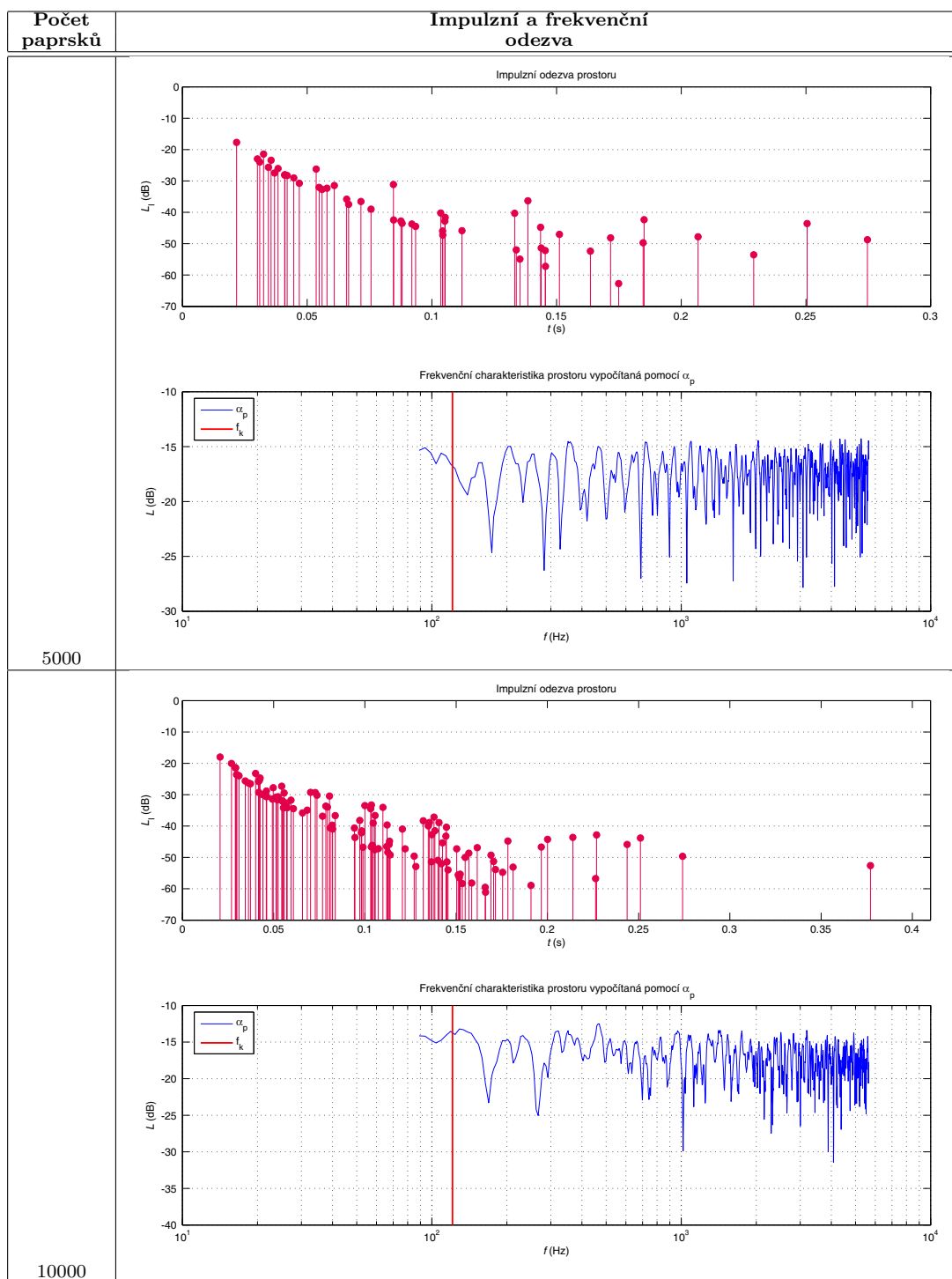


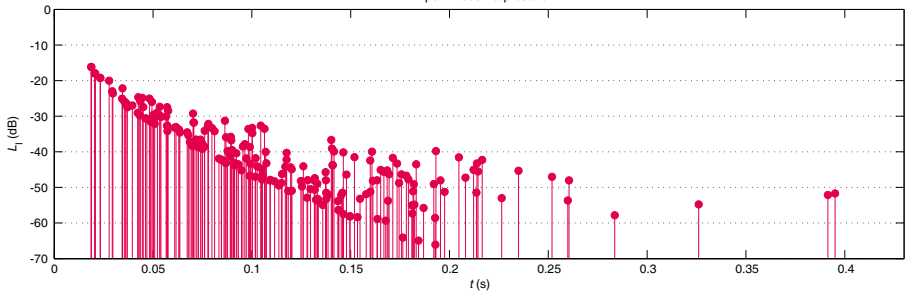
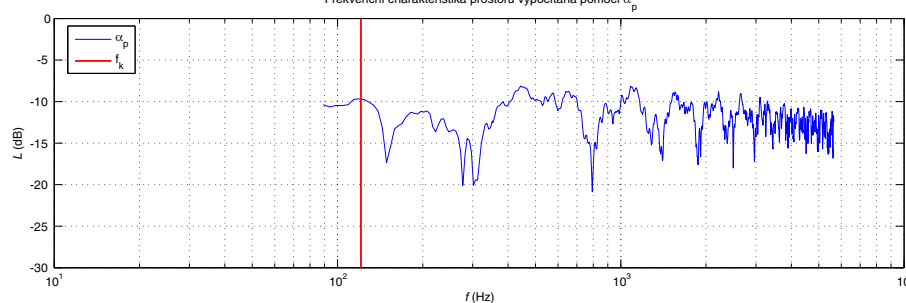
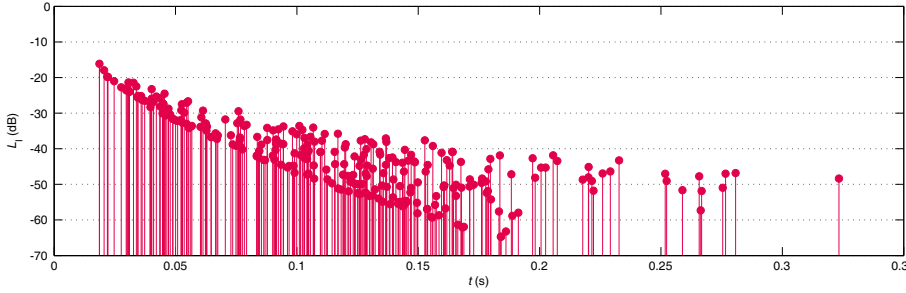
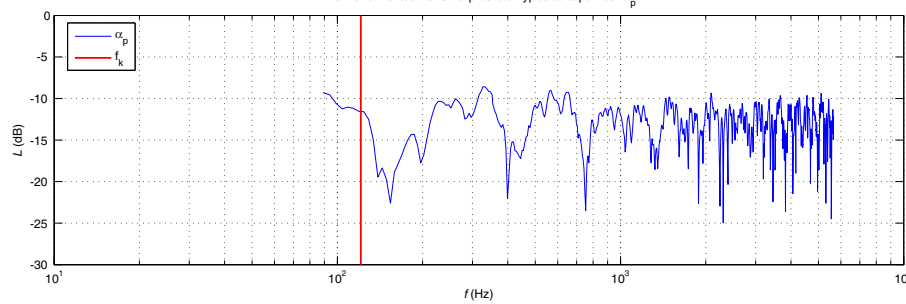
B.4 Výsledky – výpočet do 20. řádu odrazu

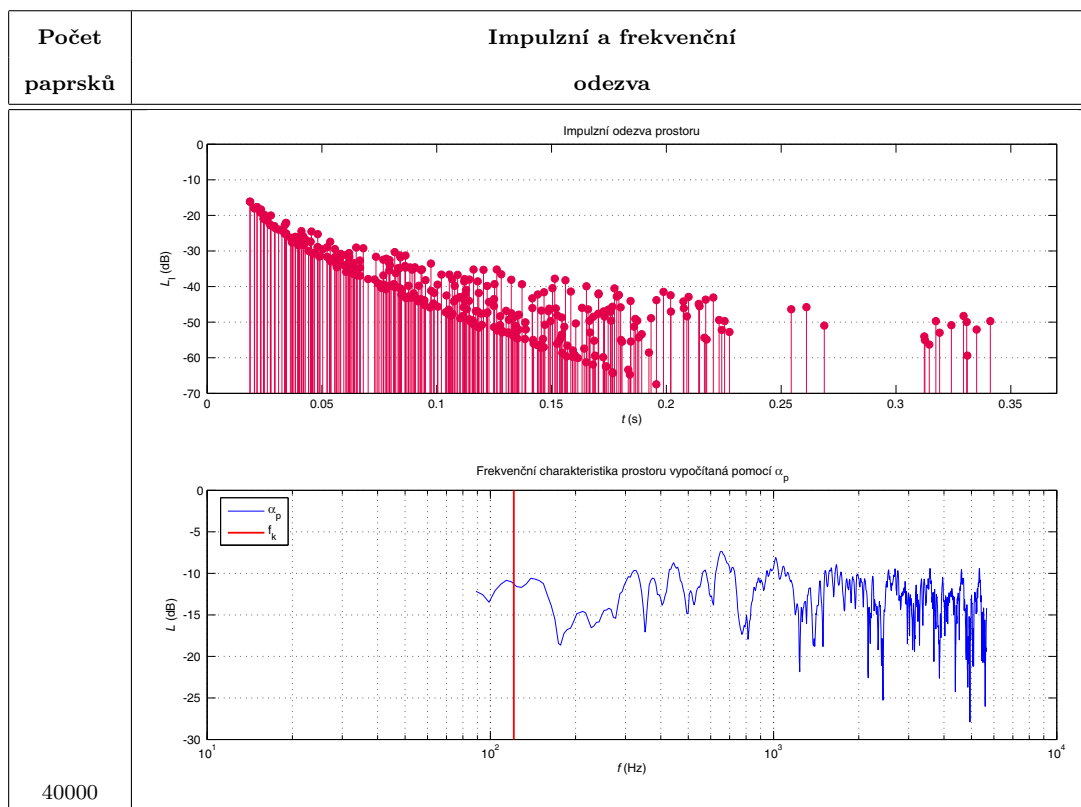
B.4.1 Tabulka výsledků

No.	Počet paprsků	Doba výpočtu	Průměrná doba výpočtu	Počet přijatých paprsků	Průměrný počet přijatých paprsků
(-)	(-)	(s)	(s)	(-)	(-)
1	5000	128,77	120,62	46	47
2		119,81		41	
3		113,29		53	
4	10000	225,94	226,34	100	102
5		222,79		90	
6		230,28		117	
7	20000	371,22	363,69	211	200
8		364,15		207	
9		355,71		182	
10	30000	538,10	562,22	324	298
11		599,51		289	
12		549,05		281	
13	40000	754,92	755,06	423	401
14		751,24		354	
15		759,02		426	

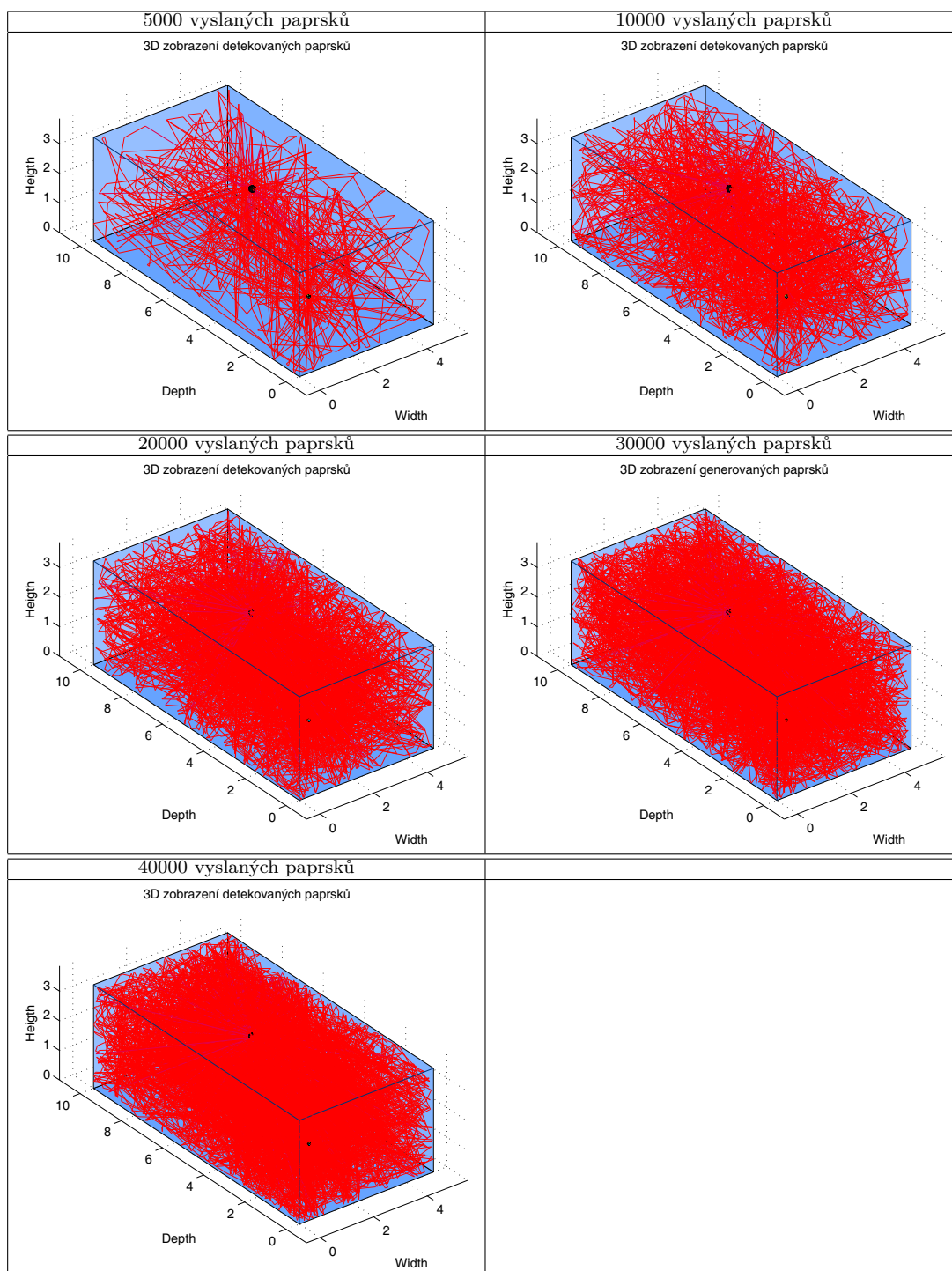
B.4.2 Výsledné charakteristiky



Počet paprsků	Impulzní a frekvenční odezva
20000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 
30000	<p>Impulzní odezva prostoru</p>  <p>Frekvenční charakteristika prostoru vypočítaná pomocí α_p</p> 



B.4.3 Zobrazení detekovaných paprsků



C NÁVOD K POUŽITÍ APLIKACE

- 1) Spustíte aplikaci MATLAB,
- 2) nastavíte cestu ke složce s aplikací **ray-tracing**,
- 3) nastavíte parametry místnosti v souboru **in.m**,
- 4) spustíte výpočet příkazem **calculate**,
- 5) výsledné charakteristiky se zobrazí po skončení výpočtu.

D OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- Elektronická verze bakalářské práce ve formátu PDF,
- MATLAB aplikace modelující akustiku místnosti.